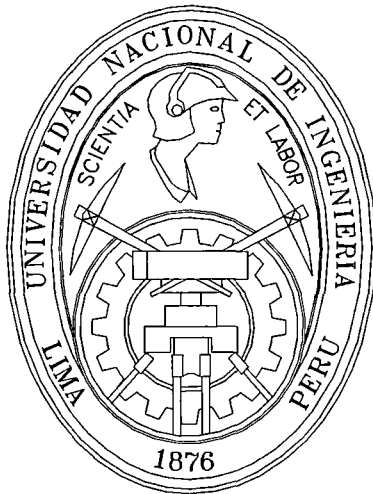


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE EROSIÓN

LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA

Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Rocío Leslie Arista Alarcón

Lima – Perú

2004

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

*A mis padres,
con infinito cariño y nostálgica gratitud.*

CONTENIDO

Introducción	vii
Reconocimientos	ix
Lista de Símbolos	x

Capítulo 1

FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA EXPERIMENTAL 1

1.1	TEORÍA DE SIMILITUD	2
1.1.1	Principios de Similitud	3
1.1.2	Derivación de los Criterios de Similitud Mecánica Perfecta	4
1.1.3	Similitud Mecánica No Perfecta o Aproximada	5
1.1.4	Límites de Validez de los Criterios de Similitud Mecánica Aproximada	7
1.2	EL LABORATORIO HIDRÁULICO	8
1.2.1	Descripción de las Instalaciones Convencionales de un Laboratorio Hidráulico	8
1.2.2	Métodos e Instrumentos de Medición Básicos	9
1.2.3	Consideraciones para la Ubicación del Modelo en el Laboratorio Hidráulico	14
1.3	MODELAMIENTO FÍSICO	15
1.3.1	Técnicas Constructivas Utilizadas en Modelos Hidráulicos	15
1.3.2	Detalles al Ingreso y Salida del Modelo Hidráulico	17
1.3.3	Diseño del Modelo Hidráulico a Escala Reducida	18
1.3.4	Operación del Modelo Hidráulico	20

Capítulo 2

ESTUDIOS PRECEDENTES ACERCA DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA PRODUCIDO POR CHORROS DE AGUA 21

2.1	ESTUDIO DE H. ROUSE (1939)	22
2.1.1	Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada	22
2.1.2	Procedimiento Experimental	23
2.1.3	Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales	24
2.2	ESTUDIO DE E. LAURSEN (1952)	26
2.2.1	Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada	26
2.2.2	Procedimiento Experimental	27
2.2.3	Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales	28
2.3	ESTUDIO DE M. CARSTENS (1969)	33
2.3.1	Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada	33
2.3.2	Análisis de los Datos Obtenidos por E. Laursen (1952)	35
2.4	ESTUDIO DE S. CHATTERJEE Y S. GHOSH (1980)	38
2.4.1	Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada Estudiado	39
2.4.2	Procedimiento Experimental	40
2.4.3	Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales	41
2.5	ESTUDIO DE N. HASSAN Y R. NARAYANAN (1985)	43
2.5.1	Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada Estudiado	43
2.5.2	Procedimiento Experimental	45
2.5.3	Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales	46

- 2.6 ESTUDIO DE S. CHATTERJEE, S. GHOSH Y M. CHATTERJEE (1980) 50
- 2.7 COMENTARIO 52

Capítulo 3

ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA 53

- 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA 54
 - 3.1.1 Difusión del Chorro de Agua en el Solado Rígido 55
 - 3.1.2 Desarrollo del Perfil de Erosión 56
 - 3.1.3 Variables Descriptivas del Material de Lecho 60
- 3.2 EXPOSICIÓN DE LA HIPÓTESIS 62
 - 3.2.1 Parámetros Adimensionales que Intervienen en el Fenómeno 62
 - 3.2.2 Adaptación del Análisis Efectuado por Carstens 64

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 66

- 4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO UTILIZADO 67
 - 4.1.1 Tramo de Ingreso al Modelo 67
 - 4.1.2 Tramo de Fondo Rígido 69
 - 4.1.3 Tramo de Fondo Móvil 71
 - 4.1.4 Material de Lecho Móvil Utilizado 73
 - 4.1.5 Tramo de Salida del Modelo 76
 - 4.1.6 Drenaje del Lecho Móvil 77
 - 4.1.7 Ubicación del Modelo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica 77
- 4.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS 79
 - 4.2.1 Variables Geométricas 79
 - 4.2.2 Caudal 79
 - 4.2.3 Tirantes de Agua 80
 - 4.2.4 Perfiles de Erosión 80
- 4.3 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS 81
 - 4.3.1 Calibración del Modelo 82
 - 4.3.2 Rango de Variación de las Variables Ensayadas 84
 - 4.3.3 Descripción de una Corrida Típica en el Modelo 85

Capítulo 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES 89

- 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS 90
 - 5.1.1 Perfiles de Erosión 94
 - 5.1.2 Velocidad de Salida del Chorro 94
 - 5.1.3 Velocidad de Iniciación del Movimiento 97
- 5.2 TRABAJO DE LOS RESULTADOS SEGÚN ANÁLISIS TEÓRICO 97
 - 5.2.1 Características Representativas del Material de Lecho 98
 - 5.2.2 Velocidad Máxima del Chorro al Ingresar al Lecho Móvil 98
 - 5.2.3 Características Geométricas de los Perfiles de Erosión 100
 - 5.2.4 Froude Densimétrico Crítico 105
 - 5.2.5 Variación de la Capacidad de Transporte en el Tiempo 106
 - 5.2.6 Variación de la Profundidad de Erosión en el Tiempo 111

Capítulo 6
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 114

6.1 CONCLUSIONES 114

6.2 RECOMENDACIONES 117

Referencias Bibliográficas 119

Anexo A

Método de Buckingham (Teorema π) 120

Anexo B

Perfiles de Erosión Obtenidos Durante las Pruebas (42 Esquemas de Flujo) 123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1	Esquema del Equipo Experimental (Rouse)	23
Figura 2.1.2	Desarrollo del Perfil de Erosión en el Tiempo (Rouse)	24
Figura 2.1.3	Resultados Experimentales Graficados (Rouse)	25
Figura 2.1.4	Resultados Experimentales Graficados (Rouse)	26
Figura 2.2.1	Esquema del Equipo Experimental y Perfiles de Erosión (Laursen)	28
Figura 2.2.2	Similitud de los Perfiles de Erosión (Laursen)	29
Figura 2.2.3	Resultados Experimentales Graficados (Laursen)	29
Figura 2.2.4	Límite de Erosión (Laursen)	30
Figura 2.2.5	Capacidad de Transporte (Laursen)	30
Figura 2.2.6	Resultados Experimentales Graficados (Laursen)	32
Figura 2.3.1	Esquema del Perfil de Erosión (Carstens)	35
Figura 2.3.2	Capacidad de Transporte del Chorro Bidimensional (Carstens)	36
Figura 2.3.3	Variación de la Profundidad de Erosión en el Tiempo (Carstens)	37
Figura 2.4.1	Chorro en Difusión y Perfiles de Velocidad (Chatterjee y Ghosh)	39
Figura 2.4.2	Esquema del Modelo Utilizado (Chatterjee y Ghosh)	40
Figura 2.4.3	Difusión del Chorro (Chatterjee y Ghosh)	41
Figura 2.4.4	Distribución de Velocidades en Solado Rígido (Chatterjee y Ghosh)	42
Figura 2.5.1	Esquema del Caso Estudiado (Hassan y Narayanan)	45
Figura 2.5.2	Desarrollo de Perfiles de Erosión en el Tiempo (Hassan y Narayanan)	46
Figura 2.5.3	Perfiles de Erosión Adimensionales a) Tiempo variable; b) Longitud de solado variable (Hassan y Narayanan)	47
Figura 2.5.4	Distribución de Velocidades en el Solado (Hassan y Narayanan)	47
Figura 2.5.5	Disminución de Velocidad Máxima en Solado (Hassan y Narayanan)	48
Figura 2.5.6	Distribución de Velocidades Típica en la Zona Erosionada (Hassan y Narayanan)	48
Figura 2.5.7	Variación de la Profundidad de Erosión Máxima en el Tiempo (Hassan y Narayanan)	49
Figura 2.6.1	Tiempo de Equilibrio y Velocidad de Salida del Chorro (Chatterjee Ghosh y Chatterjee)	50
Figura 2.6.2	Desarrollo de la Profundidad de Erosión Máxima (Chatterjee, Ghosh y Chatterjee)	51
Figura 2.6.3	Profundidad de Erosión Máxima y Número de Froude (Chatterjee, Ghosh y Chatterjee)	52
Figura 3.1.1	Esquema del Caso Estudiado (Modelo Bidimensional)	54
Figura 3.1.2	Esquema del Chorro Libre	56

Figura 4.1.1	Esquema del Modelo Físico Utilizado	68
Figura 4.1.2	Esquema de la Compuerta Plana Deslizante	70
Figura 4.1.3	Tramo de Fondo Rígido	71
Figura 4.1.4	Vista del Interior del Modelo desde la Salida	72
Figura 4.1.5	Pequeñas Muestras del Banco de Materiales Tamizados Preparado	73
Figura 4.1.6	Distribución Granulométrica del Material de Lecho	75
Figura 4.1.7	Ubicación del Modelo en la Sección de Investigación sobre Modelos Reducidos del Laboratorio Nacional de Hidráulica	78
Figura 4.3.1	Erosión Tridimensional en Periodo de Calibración del Modelo	82
Figura 4.3.2	Vista Lateral del Modelo en Operación de Prueba	83
Figura 4.3.3	Erosión Localizada Bidimensional Longitud de Solado 40 cm	84
Figura 4.3.4	Perfil de Erosión Prueba N° 8 (8 minutos)	87
Figura 4.3.5	Perfil de Erosión Prueba N° 9 (16 minutos)	87
Figura 4.3.6	Perfil de Erosión Prueba N° 10 (32 minutos)	88
Figura 4.3.7	Perfil de Erosión Prueba N° 11 (64 minutos)	88
Figura 5.1.1	Perfiles de Erosión Esquema de Flujo 4	95
Figura 5.1.2	Relación entre los Valores de Velocidad Obtenidos a Partir del Caudal y de la Carga de Agua	96
Figura 5.2.1	Perfil de Erosión Adimensional Suelo 1 - Longitud de Solado 40 cm	101
Figura 5.2.2	Perfil de Erosión Adimensional Suelo 1 - Longitud de Solado 60 cm	102
Figura 5.2.3	Perfil de Erosión Adimensional Suelo 1 - Longitud de Solado 80 cm	103
Figura 5.2.4	Perfil de Erosión Adimensional Suelo 2 - Longitud de Solado 40 cm	104
Figura 5.2.5	Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima - Suelo 1 con Longitudes de Solado Distintas	107
Figura 5.2.6	Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima - Suelo 1	108
Figura 5.2.7	Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima - Suelos 1 y 2	109
Figura 5.2.8	Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima Suelos 1 y 2 (sin distinción)	110
Figura 5.2.9	Variación de la Profundidad de Erosión Máxima en el Tiempo	112

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1.1	Suelo 1 ($d_{50} = 1,19$ mm; $\sigma_g = 1,25$)	74
Cuadro 4.1.2	Suelo 2 ($d_{50} = 1,19$ mm; $\sigma_g = 2,00$)	74
Cuadro 5.1.1	Esquemas de Flujo en las Pruebas	91
Cuadro 5.1.2	Velocidad de Chorro que Produce la Iniciación del Movimiento	97
Cuadro 5.2.1	Descripción del Material de Lecho	98
Cuadro 5.2.2	Velocidad Máxima del Chorro al Inicio del Perfil de Erosión	99
Cuadro 5.2.3	Características Geométricas del Perfil de Erosión	105

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de erosión localizada constituye uno de los problemas más frecuentes que debe enfrentar quien diseña estructuras en cauces, donde se produce una compleja interacción agua-estructura-suelo. A lo largo de muchas décadas se ha venido logrando avances en el conocimiento de esta interacción, prestándose especial atención a ciertos casos comunes — por ejemplo, la erosión localizada al pie de pilares y estribos, o aguas abajo de alcantarillas y compuertas, etc. Los resultados de estas investigaciones no son ajenos entre sí pues se trata del estudio de casos particulares que también contribuyen a la caracterización del fenómeno de erosión local en general; de este modo el esquema general de erosión va optimizándose a medida que las investigaciones se suceden y, recíprocamente, cada investigación contará con una mejor base teórica para su ejecución. Se trata de un proceso continuo.

En vista de la complejidad del fenómeno de erosión local, este no cuenta con un modelo matemático que lo describa cabalmente, recurriéndose entonces a su modelamiento físico en laboratorio. La mayor parte de las investigaciones efectuadas a la fecha son por ello de tipo experimental con base en técnicas de hidráulica experimental que sustentan la validez de sus resultados.

En el presente caso se ha estudiado el fenómeno de erosión localizada debido a un chorro de agua horizontal que fluye sumergido sobre un solado rígido hacia un lecho móvil erosionable no cohesivo. El chorro es producido por el flujo a través de una compuerta plana deslizante y el sumergimiento es controlado regulando el nivel de agua aguas abajo de esta compuerta. Es un caso particular de erosión que, según ha sido indicado, permitirá dilucidar algunos aspectos del fenómeno de erosión local, basándose en los avances hasta el momento efectuados. Se ha tenido como objetivo principal estudiar la variación en el tiempo de las dimensiones de la erosión local producida aguas abajo del solado rígido analizando el efecto de: la velocidad a la salida del chorro, como variable de flujo; la abertura de la compuerta, la longitud del solado y el tirante de sumergimiento, como variables de frontera o contorno; y las características del material de lecho, como variables de sedimento. Para ello se ha elaborado un análisis teórico del proceso de erosión local estudiado y se han ejecutado pruebas sobre un modelo físico especialmente diseñado que permitieron verificar las hipótesis planteadas.

Como se ha indicado, el modelamiento físico debe seguir ciertas normas de hidráulica experimental cuyo conocimiento es imperativo al emprender un estudio experimental en hidráulica; esta teoría se expone en el capítulo 1 con base en tres excelentes libros: el escrito por Novak y Cábeka (referencia 12), el escrito por Langhaar (referencia 10) y el escrito por Rouse (referen-

cia 19). Para conocer el estado del conocimiento en el caso de erosión localizada estudiado era necesario recopilar información acerca de investigaciones previas relacionadas al tema. Los más importantes de tales estudios se presentan en el capítulo 2. Hallaremos desde la investigación de Rouse (referencia 18) efectuada en 1939, hasta la investigación de Chatterjee, Ghosh y Chatterjee (referencia 5) efectuada en 1994, con inclusión de la efectuada en 1966 por Carstens (referencia 3), una de las más importantes para el presente estudio. Dado que el estudio experimental debe efectuarse en concordancia con un análisis teórico que brinde sustento físico a las expresiones que se hallen, este análisis ha sido presentado en el capítulo 3, con indicación de las variables que intervienen en el fenómeno y exposición de las hipótesis consideradas para el estudio, las que luego serán corroboradas o refutadas por los resultados experimentales. En el capítulo 4 se describe el modelo físico utilizado, las técnicas de medición seguidas y se da detalle de las pruebas efectuadas. Luego, en el capítulo 5, se presentan los resultados experimentales obtenidos en las pruebas y los cálculos efectuados con estos siguiendo las pautas dadas por el análisis teórico presentado. La mayor parte de los resultados se presentan en forma gráfica por conveniencia. Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas a partir de todo el estudio, y algunas recomendaciones para quienes deseen efectuar estudios experimentales en modelos hidráulicos.

Escribo aquí las palabras del Profesor Ingeniero Francisco Coronado del Águila en el Ciclo de Conferencias INVESTIGACIÓN EN MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS desarrollado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica en Febrero de 2003: "la investigación hidráulica requiere de aquellos que trabajan en las mismas condiciones de conocimiento e ingenuidad, con capacidad de observación, concentración y paciencia". No es un campo sencillo el de la investigación hidráulica en modelos a escala reducida, aún si pudiera parecerlo; espero, mediante el presente informe, contribuir al conocimiento del fenómeno de erosión localizada a la salida de una compuerta y, asimismo, a la comprensión de que el tratamiento experimental que se preste a determinado caso debe ser abordado con cautela.

RECONOCIMIENTOS

La concepción inicial del Proyecto de Investigación y Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil: "Estudios Experimentales de Erosión Localizada a la Salida de una Compuerta" se produjo gracias al asesoramiento y apoyo de la Ingeniera Petronila Ibáñez Lagorio. La ingeniera Petronila me proporcionó bibliografía obtenida por ella a lo largo de varios años y me sugirió conocer algunas bibliotecas, donde encontraría resultados de investigaciones relacionadas al tema llevadas a cabo en otros países y publicadas por la ASCE y la IAHR —en aquel momento menos accesibles que en el presente. Asimismo, asesoró el diseño del modelo físico y la parte inicial de las pruebas. El Profesor Ingeniero Edgar Rodríguez Zubiarte es el asesor de la Tesis: le puso rieles y límites a mi bosquejo inicial, me proporcionó bibliografía fundamental, ordenó mis escritos y analizó todos mis resultados. Ambos ingenieros apoyaron la búsqueda y obtención de fuentes de financiamiento para efectuar el estudio y, gracias a la gestión del Profesor Ingeniero Francisco Coronado del Águila, se obtuvo financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) y del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. El Ingeniero Coronado también me proporcionó valiosa información bibliográfica, revisó los resultados iniciales, y en cada oportunidad buscó transmitirme sus conocimientos y experiencias. Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica, gracias a la autorización y apoyo de su ex – director, el Profesor Ingeniero Arturo Rosell Calderón. La construcción del modelo estuvo a cargo de los señores trabajadores del LNH, entre quienes el señor Edward Méndez Méndez ingenió varios de los detalles constructivos y mecanismos. Durante parte de las pruebas recibí el apoyo de mi amigo, hoy Ingeniero José Martín Díaz Arias, cuya colaboración fue fundamental para sistematizar las pruebas y lograr que el modelo funcione correctamente. Me resulta especial recordar que en la biblioteca del Laboratorio Nacional de Hidráulica conocí a una dama excepcional que ya no está con nosotros, la señorita Yrma Quiñones Guzmán, cuyo orden y servicio, o su sólo conversar, eran un verdadero aliciente para los tesisistas, investigadores y profesores. A lo largo del estudio he recibido también el apoyo de personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos, donde efectué varias mediciones de los suelos utilizados. Durante la elaboración del escrito tuve la suerte de contar con el apoyo de mi esposo, Profesor Richard Zavaleta López, quien leyó todos los capítulos y me sugirió varias correcciones. Asimismo, hice uso de su extensa biblioteca, lo cual fue de especial ayuda en aquellas etapas en las que surgen varias dudas.

Agradezco inmensamente todo este apoyo.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleración dimensión geométrica en algunos estudios
A	área del perfil de erosión
b	abertura de compuerta dimensión geométrica en algunos estudios
B	módulo de elasticidad volumétrica o compresibilidad del fluido ancho del canal en algunos estudios
B_o	grosor del chorro en algunos estudios
C_D	coeficiente de arrastre
C_L	coeficiente de sustentación
d	diámetro de la partícula de sedimento longitud característica derivada
d_m	diámetro medio de las partículas de sedimento
E_l	escala entre prototipo y modelo de la variable denotada por el subíndice; en este caso, escala de longitud
F	fuerza
Fr	número de Froude
F_{95}	número de Froude densimétrico en función del diámetro de partícula d_{95}
F_{95c}	valor crítico de F_{95}
g	aceleración de la gravedad
h	tirante de sumergimiento profundidad de agua
h_m	profundidad de erosión máxima en algunos estudios
H_m	profundidad de erosión máxima en el equilibrio según algunos estudios
Δh	carga de agua que produce el flujo
K_s	constante que depende de la geometría del perfil de erosión
l	longitud
L	longitud de solado dimensión elegida en algunos estudios como característica
L_k	longitud del núcleo en un chorro libre
m	masa
Ma	número de Mach
Ne	número de Newton
N_s	número de sedimento introducido por Carstens
N_{sc}	número de sedimento crítico introducido por Carstens
q	caudal por unidad de ancho o caudal específico
q_s	capacidad de transporte específica
Q	caudal
Q_s	capacidad de transporte
Re	número de Reynolds
s	profundidad de erosión máxima
S	velocidad de ingreso de sedimentos
t	tiempo
U	velocidad máxima en un perfil de velocidad en algunos estudios velocidad en un perfil de velocidad en algunos estudios
U_m	velocidad máxima en cada perfil de velocidad del chorro en difusión velocidad máxima en la sección vertical que pasa por la posición de profundidad de erosión máxima en algunos estudios
U_{mo}	velocidad máxima en el extremo final del solado o inicio del lecho móvil
U_o	velocidad de salida del chorro
v	velocidad
V	velocidad media

\forall	volumen
w_m	velocidad de caída media geométrica
We	número de Weber
x	distancia horizontal medida desde la salida del chorro
X	abscisa del perfil de erosión
X_D	distancia horizontal desde el inicio del perfil de erosión hasta la cresta de la duna
X_L	valor de X_D en el límite de erosión
Y	ordenada del perfil de erosión
δ	espesor de la capa límite
ϕ	ángulo de reposo del suelo
γ_s	peso específico de la partícula de sedimento
γ	peso específico del agua
μ	viscosidad dinámica del fluido
ν	viscosidad cinemática del fluido
π	parámetro adimensional
ρ	densidad del fluido, densidad del agua
ρ_s	densidad del cuerpo, densidad de la partícula de sedimento
σ	tensión superficial del fluido
σ_g	desviación estándar geométrica de los diámetros de sedimento
σ_w	desviación estándar geométrica de la velocidad de caída
v	factor de velocidad introducido por Rouse
Δ	peso específico relativo del material sólido sumergido

Capítulo 1

FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA EXPERIMENTAL

El diseño de una obra hidráulica trata principalmente con el equilibrio y movimiento del agua o combinaciones agua-sedimento. En algunos casos la mecánica del agua ha contado con una teoría analítica y descripción matemática cabalmente desarrolladas; sin embargo, en casos más complejos su conocimiento ha sido —y en casos aún es— limitado, dada la dificultad o imposibilidad de describir sus características con métodos puramente matemáticos. Como auxilio a este vacío se ha recurrido a la hidráulica experimental, cuyo desarrollo ha sido intenso durante el pasado siglo XX, especialmente en la segunda mitad.

La experimentación en ingeniería hidráulica permite: 1) verificar las ecuaciones formuladas analíticamente para describir un proceso o fenómeno hidráulico dado, lo cual es usualmente referido como investigación básica; o 2) optimizar el diseño de una obra hidráulica, lo cual corresponde a la investigación aplicada. Esta investigación, básica o aplicada, se desarrolla en modelos físicos, los cuales son diseñados para reproducir lo más fielmente posible el comportamiento de la situación modelada —usualmente referida como prototipo; si bien se tendrá ciertas limitaciones, estas deben ser minimizadas o, en todo caso, tenidas en cuenta tanto al efectuar las pruebas experimentales como al analizar los resultados.

Para que el estudio experimental sea válido, y pueda utilizarse los resultados. éste debe cumplir con ciertas normas dadas por la teoría de similitud.

1.1 TEORÍA DE SIMILITUD

La similitud, aplicada a modelos hidráulicos, puede ser definida como una correspondencia conocida entre el comportamiento de un modelo y el de su prototipo [19]. Esta correspondencia es usualmente limitada pues generalmente es imposible satisfacer todas las condiciones requeridas para una similitud perfecta; sin embargo, definidas las limitaciones puede obtenerse una similitud no perfecta pero útil.

La similitud no perfecta reduce cada problema de hidráulica a la interacción de una fuerza principal y la fuerza inercial, y desarrolla entonces una serie de criterios de similitud, cada uno de los cuales corresponde a determinada fuerza principal. Utilizando estos criterios de similitud puede establecerse la correspondencia modelo-prototipo.

Si bien el método más apropiado para determinar los criterios de similitud de los fenómenos es utilizando ecuaciones diferenciales que describan matemáticamente el fenómeno físico investigado, es usual carecer de estas ecuaciones, recurriéndose entonces al análisis dimensional. Para ello se requiere reconocer cuidadosamente las bases físicas del fenómeno investigado y determinar las variables que lo influyen, para que quede expresado por una ecuación dimensionalmente correcta que contenga las variables involucradas agrupadas en parámetros adimensionales. La derivación de esta ecuación dimensionalmente correcta depende de la complejidad del fenómeno; en algunos casos puede establecerse una relación entre los parámetros que participan en la ecuación utilizando sólo el análisis, mientras que en otros casos es imprescindible llevar a cabo pruebas experimentales que permitan complementar este análisis y determinar la forma en que los parámetros están relacionados. Sólo entonces puede establecerse el criterio de similitud apropiado con base en la ecuación que supuestamente rige el fenómeno. Para verificar que determinado criterio de similitud es el apropiado puede efectuarse el estudio experimental en dos o más modelos físicos supuestamente similares. Si la relación entre los parámetros estudiados depende del modelo utilizado entonces el criterio de similitud derivado a partir de una de estas relaciones no es exacto, hay un factor adicional que está influenciando el fenómeno, que no está siendo considerado en su descripción, y que se advierte al estudiar dos modelos distintos.

En hidráulica experimental puede hacerse uso de los denominados modelos análogos, los cuales reproducen la situación de prototipo en un medio físico distinto que puede ser eléctrico, mecánico, o hidrodinámico, debiéndose cumplir que las ecuaciones que representan modelo y prototipo sean matemáticamente idénticas. Sin embargo, los modelos hidráulicos más ampliamente utilizados son los modelos a escala reducida; los alcances sobre hidráulica experimental que se presentan en este capítulo están referidos a este tipo de modelo.

1.1.1 Principios de Similitud

Los principios de similitud requeridos para considerar que el modelo a escala reducida y su prototipo son similares son los siguientes:

- a) Similitud geométrica: si denotamos E_l como la escala de longitudes entre prototipo y modelo, es decir, la relación entre la longitud de un segmento en prototipo y la longitud del segmento correspondiente (u homólogo) en modelo, tendremos tres componentes de escala de longitudes que, si modelo y prototipo son geoméricamente similares, deben ser iguales: $E_{lx} = E_{ly} = E_{lz} = E_l$. Cuando hay similitud geométrica los ángulos son exactamente los mismos en modelo y prototipo, es decir, ambos tienen la misma forma.

- b) Similitud cinemática: cada componente de velocidad en un punto del modelo guarda una relación constante con la de su homólogo en prototipo. Para tener similitud cinemática no es necesario que las tres componentes de escala de velocidad: E_{vx} , E_{vy} , E_{vz} , sean iguales; sin embargo, si los sistemas son geoméricamente similares, se tendrá una única escala de velocidad: $E_v = E_l/E_t$, donde E_t es la escala de tiempo. Se cumple lo mismo para la aceleración: $E_a = E_l/E_t^2$. Cuando se tiene similitud geométrica y cinemática las trayectorias de las partículas homólogas son geoméricamente similares.

- c) Similitud dinámica: cada componente de fuerza en un punto del modelo guarda una relación constante con la de su homólogo en prototipo. La similitud dinámica no implica que las componentes de escala de fuerza, E_{F_x} , E_{F_y} , E_{F_z} , sean iguales.
- d) Similitud mecánica: los sistemas son geométrica, cinemática y dinámicamente similares. Se tiene entonces una única escala de fuerzas: $E_F = E_m E_a = E_m E_l / E_t^2 = E_\rho E_l^2 E_v^2$.

1.1.2 Derivación de los Criterios de Similitud Mecánica Perfecta

Si se desea determinar la fuerza actuante sobre un cuerpo debido al flujo de cierto fluido estarán involucradas las siguientes variables: la fuerza actuante sobre el cuerpo F ; la longitud característica d , y la densidad ρ_s , del cuerpo; la densidad ρ , la viscosidad μ , la tensión superficial σ , y el módulo de elasticidad volumétrica o compresibilidad B , del fluido; la velocidad media del flujo v ; la longitud l , el ancho b , y la profundidad h del medio en el que ocurre el fenómeno; y la aceleración de la gravedad g . Podemos entonces, mediante análisis dimensional*, obtener la siguiente expresión general:

$$\frac{F}{\rho l^2 v^2} = \Phi \left(\frac{v^2}{gl}, \frac{\rho l v}{\mu}, \frac{\rho v^2 l}{\sigma}, \frac{\rho v^2}{B}, \frac{h}{l}, \frac{b}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\rho_s}{\rho} \right)$$

Esta expresión debe ser válida en prototipo y modelo. Si deseamos tener similitud mecánica (incluye similitud geométrica) entre prototipo y modelo, deben cumplirse las relaciones de escala presentadas para estos principios de similitud: $E_F = E_\rho E_l^2 E_v^2$ y E_l única; ello es posible sólo si las escalas de los parámetros adimensionales mostrados a la derecha (entre paréntesis) son iguales a la escala del parámetro adimensional a la izquierda, e iguales a la unidad.

* El análisis dimensional ha sido efectuado siguiendo el método de Buckingham (Teorema π) descrito en el Anexo A.

Obtenemos entonces lo siguiente: $E_h = E_b = E_d = E_l$, que cumple la condición de similitud geométrica; $E_{\rho_s} = E_\rho$, condición de proporcionalidad de masas; y $E_{Ne} = E_{Fr} = E_{Re} = E_{We} = E_{Ma} = 1$, condición de proporcionalidad de cinco números adimensionales: Newton, Froude, Reynolds, Weber, y Mach. El número de Newton, $Ne = F/\rho l^2 v^2$, considera la fuerza inercial; el número de Froude, $Fr = v/\sqrt{gl}$, considera las fuerzas de gravedad; el número de Reynolds, $Re = \rho l v/\mu = l v/\nu$, considera las fuerzas viscosas; el número de Weber, $We = \rho v^2 l/\sigma$, considera las fuerzas de tensión superficial; y el número de Mach, $Ma = v/\sqrt{B/\rho}$, considera las fuerzas de compresibilidad. Tenemos entonces:

$$Ne = \varphi \left(Fr, Re, We, Ma, \frac{h}{l}, \frac{b}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\rho_s}{\rho} \right)$$

Y como criterios de similitud mecánica perfecta tenemos:

$$E_{Ne} = E_{Fr} = E_{Re} = E_{We} = E_{Ma} = \frac{E_h}{E_l} = \frac{E_b}{E_l} = \frac{E_d}{E_l} = \frac{E_{\rho_s}}{E_\rho} = 1$$

1.1.3 Similitud Mecánica No Perfecta o Aproximada

En la mayoría de casos el modelo puede ser elaborado cumpliendo las condiciones de similitud geométrica y de proporcionalidad de masas sin problema; sin embargo, para obtener similitud mecánica, $E_{Ne} = 1$, resulta prácticamente imposible lograr que se cumpla la condición de proporcionalidad de los cuatro números adimensionales restantes simultáneamente. Al cumplir $E_{Fr} = 1$ tenemos la siguiente correspondencia entre prototipo y modelo: $E_v = \sqrt{E_l}$, pues en prototipo y modelo actúa la misma aceleración de la gravedad, $E_g = 1$; al cumplir $E_{Re} = 1$ resulta $E_v = E_\mu/(E_\rho E_l)$; para $E_{We} = 1$ obtenemos $E_v = \sqrt{E_\sigma}/\sqrt{E_\rho E_l}$; y para $E_{Ma} = 1$, $E_v = \sqrt{E_B}/\sqrt{E_\rho}$.

Es imposible hallar un fluido para el estudio en modelo que tenga la densidad, viscosidad, tensión superficial y módulo de compresibilidad que permitan cumplir todas estas relaciones, a menos que se investigue un modelo de las mismas dimensiones que el prototipo ($E_l = 1$), y con un fluido que cumpla la condición: $E_\rho = E_\mu = E_\sigma = E_B$; esta última condición es aún difícil de satisfacer, a menos que, como suele suceder, se utilice el mismo fluido en modelo y prototipo: $E_\rho = E_\mu = E_\sigma = E_B = 1$.

Definitivamente no es lo deseable trabajar sobre un modelo con las mismas dimensiones que el prototipo de modo que para trabajar sobre un modelo a escala reducida debemos conformarnos con obtener una similitud mecánica no perfecta o aproximada en cuyo caso no se cumple la condición de proporcionalidad de los cuatro números adimensionales sino sólo de aquel que considera la fuerza predominante en el fenómeno de flujo analizado. De ello se desprenden los cuatro criterios, usualmente denominados leyes de similitud, derivados teóricamente, y utilizados comúnmente en investigaciones en modelo físico:

1. Ley de Froude: $Fr_m = Fr_p$, las fuerzas de gravedad predominan
2. Ley de Reynolds: $Re_m = Re_p$, las fuerzas viscosas predominan
3. Ley de Weber: $We_m = We_p$, las fuerzas de tensión superficial predominan
4. Ley de Mach: $Ma_m = Ma_p$, las fuerzas de compresibilidad predominan

No es usual que las fuerzas de tensión superficial y compresibilidad sean predominantes; la mayoría de estudios en modelo hidráulico simulan casos en los que bien las fuerzas de gravedad o las viscosas predominan. Un flujo turbulento con superficie libre puede ser modelado utilizando la ley de Froude. Un flujo permanente a través de un conducto a presión puede ser modelado utilizando la ley de Reynolds. Establecer la ley de similitud apropiada para el estudio de determinado fenómeno de flujo requiere de conocimiento, raciocinio y experiencia; en algunos casos pudieran no ser aplicables ninguna de las leyes de similitud derivadas teóricamente, siendo necesario recurrir a la experimentación para derivar criterios de similitud especiales.

1.1.4 Límites de Validez de los Criterios de Similitud Mecánica Aproximada

Aunque no obtengamos similitud mecánica perfecta, la similitud mecánica aproximada nos proporcionará resultados bastante adecuados siempre que el criterio de similitud adoptado sea la ley que exprese la relación de las fuerzas que determinan el fenómeno investigado o, por lo menos, aquellas que son decisivas y prevalecen sobre todos los otros tipos de fuerzas [12]. El modelo físico a escala reducida debe entonces ser minuciosamente diseñado, construido y operado en el laboratorio hidráulico, garantizando que se cumpla con el criterio de similitud reinante en el prototipo. Cada criterio de similitud tiene un límite de validez, el cual está dado principalmente por la escala geométrica del modelo —intervienen también su diseño y operación; en general, el límite de validez responde a lo siguiente: ninguna otra fuerza, más que aquella según la cual el fenómeno es modelado, debe adquirir importancia en el modelo físico reducido.

Además de los límites impuestos para evitar la aparición en modelo de fuerzas que en el análisis teórico del fenómeno se han considerado despreciables, se tiene la siguiente condición: el régimen de flujo en modelo y prototipo debe ser el mismo, sea irrotacional o rotacional, laminar o turbulento, condición que también limita la escala geométrica del modelo pues en un modelo muy pequeño el flujo puede resultar laminar mientras lo común es que el flujo en prototipo sea turbulento.

Estas limitaciones en la escala geométrica del modelo pueden resultar en modelos que requieren ser muy grandes para obtener similitud mecánica aproximada. Por ello, en algunos casos se recurre a los modelos distorsionados: una o más de sus escalas geométricas, o la escala de rugosidades, o la escala de gravedad específica del material de lecho, son distorsionadas. En tal caso no se obtiene similitud mecánica aproximada pues no se cumplirá la condición de similitud geométrica o la de proporcionalidad de masas; sin embargo, puede aún obtenerse una similitud dinámica aproximada.

1.2 EL LABORATORIO HIDRÁULICO

1.2.1 Descripción de las Instalaciones Convencionales en un Laboratorio Hidráulico

Por lo general, los laboratorios hidráulicos tienen una parte cubierta bajo techo y una parte extensa no cubierta —al aire libre. En la parte cubierta se tiene los canales de observación^{*}, los equipos de experimentación —usualmente utilizados con fines de enseñanza—, y los modelos pequeños. En la parte no cubierta se construye los modelos de grandes dimensiones. En el laboratorio suele trabajarse con circuitos cerrados de agua; estos usualmente consisten de una cisterna, una estación de bombeo que envía agua hacia los tanques elevados, una serie de tuberías que descargan agua desde estos tanques a través de medidores de flujo y hacia los canales de observación, equipos de experimentación y modelos y, finalmente, canales de retorno para conducir el agua nuevamente hacia la cisterna, la cual es llenada con agua limpia desde la línea troncal. Si el agua en un circuito cerrado se contamina entonces debe ser reemplazada.

El tanque elevado hacia el cual se bombea agua debe ser ubicado a suficiente altura respecto de los modelos. Los tanques son usualmente provistos de un vertedero de arista viva bastante largo de modo de mantener un nivel de agua casi constante, tanto durante el suministro variable de agua desde las bombas como durante las variaciones de caudal en los otros modelos o equipos del laboratorio. Obviamente es necesario que el caudal bombeado hacia el tanque sea mayor que el caudal retirado de éste para su uso en el laboratorio; el exceso de agua es vertido, inutilizado, a través del vertedero de arista viva y es retornado a la cisterna. La carga de agua sobre el vertedero largo permanece casi constante, aún para un caudal variable; la fluctuación del nivel de agua es del orden de milímetros y no afecta al valor de la carga de agua sobre el modelo o su dispositivo de medición (usualmente de varios metros) y, por ello, no afecta al caudal evacuado a través de una abertura constante de la válvula de regulación en la tubería de ingreso al modelo.

^{*} Canales de sección rectangular y paredes de vidrio denominados *flumes* en inglés. El término en inglés se ha extendido al castellano; por ello su mención.

El tanque elevado es usualmente permanente, construido como parte de los equipos de un laboratorio hidráulico, y frecuentemente abastece a varios modelos. Esta solución es económica pero tiene la desventaja de que los flujos en distintos modelos que trabajan simultáneamente y son abastecidos por una tubería de distribución con acoplamientos pueden influenciarse entre ellos. Por esta razón a veces se construyen tanques separados o por lo menos líneas directas de abastecimiento desde el tanque hacia cada canal de observación permanente, equipo de experimentación o modelo.

Los canales de observación utilizados en laboratorio tienen sección rectangular y paredes de vidrio; pueden equiparse de un generador de olas en cualquiera de sus extremos, o adaptarse un tanque de sedimentación a la salida. Sobre sus paredes laterales se tienen rieles para el movimiento longitudinal de aparatos de medición. La construcción de modelos en su interior permite economizar recursos y, en caso que el modelo construido sea bidimensional, las paredes de vidrio permitirán filmar y tomar fotografías del flujo en planos paralelos a éstas. Debe observarse que el ancho de los canales de observación permita minimizar la influencia de las paredes laterales sobre el flujo. Los canales de observación pueden ser fijos o de pendiente variable; su uso estará determinado por el tipo de pruebas a efectuarse.

El laboratorio hidráulico cuenta con otras instalaciones adicionales: canales de calibración, para la calibración de los instrumentos de medición de velocidad; tanque de calibración volumétrico, para calibrar los medidores de caudal. Los instrumentos de medición deben ser calibrados periódicamente.

1.2.2 Métodos e Instrumentos de Medición Básicos

La instrumentación de los laboratorios hidráulicos viene siendo modernizada debido al desarrollo y uso de la electrónica y el uso de computadoras y otras técnicas de procesamiento de datos; ambos, en conjunto, permiten efectuar las mediciones de manera más precisa y rápida. Aún así, no debe dejarse de lado el punto de vista económico: a pesar de las técnicas de instrumentación en rápido desarrollo, no es necesario utilizar dispositivos de medición sofisticados si un instrumento simple puede hacer el trabajo [12].

Hacer una reseña completa de las varias técnicas de medición e instrumentación existentes a la fecha no resulta productivo pues ésta se haría rápidamente obsoleta; lo que se recomienda es consultar la vasta información comercial disponible según el campo de interés. Se indica a continuación algunos de los métodos e instrumentos básicos usuales en un laboratorio hidráulico*.

- a) Medición de niveles de agua permanentes: el instrumento más simple y más utilizado para la medición de niveles de agua permanentes es el limnómetro, con una precisión de hasta 0.1 mm. Los limnómetros son acoplados a carros que permiten su movimiento longitudinal y, de ser necesario, transversal. La indicación de la posición del limnómetro se consigue con una punta de aguja acoplada a éste, la cual puede ser recta (el limnómetro *desciende* hasta tocar el nivel de agua que se desea medir) o en forma de gancho con la punta hacia arriba (el limnómetro *asciende* hacia la superficie de agua). El contacto de la punta con el nivel de agua puede ser observado a ojo o indicado electrónicamente. Algunas veces el limnómetro es provisto de un trinche de precisión, esto es, dos puntas dispuestas de modo que haya una diferencia de nivel entre ellas igual al error máximo permisible en la medición del nivel de agua. Si ambas puntas se adaptan a un indicador electrónico, la medición debe efectuarse cuando se encienda uno sólo de los indicadores. En algunos casos no se requiere mucha precisión en la medición del nivel de agua siendo suficiente utilizar miras ordinarias.

- b) Medición de niveles de agua fluctuantes: en el caso de niveles de agua que fluctúan *lentamente* las mediciones pueden ser efectuadas del mismo modo que para el caso de niveles permanentes; sin embargo, el medidor debe estar constantemente en observación, por ello se utiliza frecuentemente regis-tradores. Para medir niveles de agua *rápidamente* fluctuantes debe utilizarse instrumentos electrónicos. La posición del nivel de agua también puede ser determinada fotográficamente mediante una cámara ubicada lateral al modelo y aproximadamente al mismo nivel que el agua; las fotografías son tomadas a través de la pared de vidrio del modelo sobre la cual es útil dibujar una cuadrícula coordinada con indicación de longitudes.

* Extractos de la referencia 12 aplicables al caso con inclusión de observaciones propias.

- c) Medición de niveles del lecho: luego de drenar el modelo, el nivel del lecho puede ser medido con un limnómetro normal. En modelos tridimensionales el limnómetro es utilizado para hallar curvas de nivel sobre el lecho móvil; simultáneamente se coloca una hebra blanca sobre la curva de nivel para su registro fotográfico. Medir el nivel del lecho bajo agua y con el experimento en curso es relativamente complicado pues la observación de los instrumentos es estorbada por la difracción de la luz, además el acercamiento de la punta de un medidor hacia el lecho móvil durante el experimento puede también alterar la formación de la erosión. Se ha desarrollado instrumentos ópticos sofisticados que miden el nivel del lecho sin contacto.
- d) Medición del caudal: el método más exacto para medir el caudal es la determinación del peso o volumen de líquido conducido en un lapso de tiempo hacia instalaciones especialmente calibradas; sin embargo, este método no suele ser utilizado en las investigaciones en modelo. La medición de caudal comúnmente utilizada en laboratorio es mediante uno o más vertederos construidos en tanques de medición fijos o móviles. Se usa el vertedero triangular de 90° , de $53^\circ 08'$, de 27° o, para caudales mayores, el vertedero rectangular. La carga sobre la cresta del vertedero se mide con un limnómetro, usualmente colocado en una cubeta pequeña conectada al tanque de medición por medio de una manguerilla; esta comunicación del tanque con la cubeta permite que se alcance el mismo nivel de agua en ambos. El limnómetro debe ser calibrado de modo tal que cuando el nivel de agua coincida con la cresta del vertedero, la lectura sea cero; de este modo las siguientes lecturas corresponderán directamente a la carga de agua respecto de la cresta. Los requerimientos en el tamaño del tanque, la posición aguas arriba a la cual debe medirse la carga sobre la cresta, y detalles de las placas del vertedero así como los coeficientes de descarga apropiados se dan en especificaciones estandarizadas. Si no se siguen estos requerimientos entonces el tanque completo debe ser calibrado antes de usarse y esta calibración debe ser chequeada periódicamente. El caudal puede ser también medido utilizando dispositivos basados en el principio de contraer el flujo y medir las diferencias de presión resultantes con un manómetro diferencial. De éstos el más utilizado es el venturímetro, el cual debe ser colocado en una

tubería recta y larga, y cuya precisión es en general buena, excepto para caudales muy pequeños. En este caso, es muy importante la medición de presiones. Usualmente se coloca un número de piezómetros alrededor de la sección de medición, los cuales son conectados a un aro tubular con una única salida que transmite una presión promedio al manómetro. Además del venturímetro, puede hacerse uso de orificios y boquillas, todos los cuales deben ser siempre calibrados, especialmente si su ubicación y construcción no está de acuerdo con las especificaciones estándar. También se tiene métodos en los cuales se miden velocidades locales y a partir de estas se obtiene el caudal, bien por integración o calibrando la relación entre la velocidad media en la sección transversal y la velocidad en el punto medido.

- e) Medición de la velocidad de flujo: un método frecuentemente utilizado para la medición de velocidades locales consiste en la determinación de la velocidad a partir de la carga de velocidad medida con la ayuda de varios tipos de tubo de Pitot. La magnitud de la carga de velocidad relativa se halla a partir de la diferencia de presión en dos o más puntos sobre el dispositivo de medición, el cual es sumergido en el flujo. El dispositivo más comúnmente utilizado es el tubo de Prandtl estándar, que es un tubo de Pitot armado de modo tal que la diferencia de presión entre la parte frontal —sección vertical— del tubo (colocado en el punto de medición) y la parte tangencial —horizontal—, es medida directamente mediante un manómetro diferencial. Dado que en la parte frontal se produce un punto de estancamiento (velocidad nula) y en la parte tangencial se tiene la velocidad de flujo no alterada, se trata de una diferencia entre la presión dinámica y la presión estática, la cual, expresada como carga, será equivalente a la carga de velocidad relativa buscada. El tubo de Prandtl mide correctamente la velocidad sólo si es utilizado en dirección contraria al flujo, con una desviación de $\pm 15^\circ$. Los tipos de tubo de Pitot que se utilicen, si difieren de los tipos ampliamente probados, deben ser calibrados antes de ser utilizados y deben ser utilizados sólo para el rango de mediciones calibrado. El dispositivo de medición de velocidad más ampliamente utilizado y que trabaja sobre la base de un principio mecánico es el correntómetro. Para las investigaciones en modelo es importante que la hélice del correntómetro sea tan pequeña y sensible como

sea posible, además de ofrecer un rango de mediciones acorde con los requerimientos del modelo. El método de registro en la mayoría de tipos se basa en el principio que durante la rotación de la hélice cambia la distancia entre un electrodo fijo y uno de los casquetes de la hélice en rotación. Así la resistencia eléctrica se incrementa o disminuye y se registran los impulsos eléctricos resultantes en un contador. A partir del número de revoluciones por minuto puede obtenerse la velocidad del flujo, previa calibración del correntómetro. La dirección del flujo se determina fácilmente con hebras de algodón en un cable delgado o introduciendo partículas de piedra pómez, polvo de aluminio, etc. En un flujo bidimensional también es posible estimar la velocidad a partir de trazas, con consideración del tiempo de exposición correspondiente. Se tiene otros métodos más modernos.

- f) Medición de la presión hidrodinámica: la presión hidrodinámica suele medirse con manómetros de tubo simples, de vidrio o plexiglás, conectados a la abertura piezométrica con una manguera de jebes o plástico. Los manómetros son puestos usualmente uno al lado del otro en un panel con una regla vertical graduada de modo que puede leerse el valor de la carga de presión de todos los piezómetros del modelo en un mismo lugar. El diámetro del tubo debe ser por lo menos 10 a 15 mm para reducir la influencia de la tensión superficial; aún para un diámetro de 10 mm la elevación de agua en el tubo por capilaridad es alrededor de 3 mm. Los detalles de la abertura piezométrica son muy importantes. Su eje debe ser perpendicular a la superficie sobre la cual se mide la presión. El diámetro del orificio debe ser relativamente pequeño, 1,0 a 1,5 mm, su borde no debe ser muy redondeado y no debe proyectarse al interior del flujo u obstaculizarlo. La superficie alrededor de la abertura debe ser alisada en una distancia de por lo menos 50 veces el diámetro del orificio del piezómetro. Los dispositivos para medir las variaciones de presión y fluctuaciones son importantes en investigaciones con presiones negativas, especialmente en fenómenos de cavitación, y para el estudio de fluctuaciones de presión provocadas por un flujo turbulento sobre alguna estructura hidráulica. Un ejemplo de estos dispositivos son los transductores, cuya medición electrónica puede ser registrada en un oscilógrafo.

- g) Medición en mezclas agua-sedimento: al trabajar con mezclas de sedimentos y agua en modelos fluviales con lecho móvil, debe establecerse qué mediciones son necesarias para incluir los equipos apropiados. Si el estudio considera ingreso de sedimentos al modelo, debe conocerse el caudal de sedimentos suministrado; entonces es necesario acoplar un equipo para la dosificación de los sedimentos que ingresarán al modelo. Es probable que el caudal de sedimentos a la salida sea distinto al de ingreso y se considere necesario conocer su valor, bien como caudal o como volumen o peso. Para ello puede considerarse una descarga que permita la separación de los sedimentos del agua, a fin de que esta continúe su descarga y los sedimentos sean retenidos para su medición. Debe tomarse las previsiones, de ser necesario, para controlar estas mediciones en el tiempo. En caso de efectuarse mediciones de caudal sólido de fondo o caudal sólido en suspensión al interior del modelo y para distintas condiciones, puede utilizarse algunos de los equipos disponibles para mediciones en campo, los cuales tienen técnicas de funcionamiento variables. También puede ser necesario controlar la curva granulométrica de los sedimentos de fondo y suspensión.

1.2.3 Consideraciones para la Ubicación del Modelo en el Laboratorio Hidráulico

El modelo a escala reducida será ubicado en alguno de los circuitos cerrados de agua de los que dispone el laboratorio hidráulico, es decir, el ingreso del modelo empalmará con alguna de las tuberías de alimentación de agua que descargan de alguno de los tanques elevados, y su salida empalmará con alguno de los canales de retorno a la cisterna. La elección de la ubicación debe considerar varios factores, por ejemplo: el área y altura que ocupará el modelo a determinada escala de reducción, los caudales con los que operará el modelo durante las pruebas, su proximidad a las tuberías de alimentación y canales de retorno apropiados del laboratorio, la posibilidad de reciclar modelos en desuso o de utilizar los canales de observación permanentes del laboratorio para reducir costos, la accesibilidad a las partes del modelo tanto durante la construcción como durante su operación, etc. El análisis de estos y otros factores permitirá elegir una ubicación óptima: funcional y económica.

1.3 MODELAMIENTO FÍSICO

Establecidos los problemas a ser resueltos durante una investigación, y habiéndose descartado la suficiencia de una solución puramente teórica o analítica, se procede al modelamiento físico, el cual, como ya ha sido indicado, puede efectuarse mediante modelos análogos o modelos a escala reducida, siendo los últimos los de uso más extendido. El valor del modelo dependerá de la precisión con la que demuestre aquella fase del comportamiento de su prototipo que está siendo investigada [19]; su diseño, construcción y operación deben ser cuidadosamente efectuados a fin de que el modelamiento físico se lleve a cabo con éxito.

1.3.1 Técnicas Constructivas Utilizadas en Modelos Hidráulicos

Al diseñar el modelo, éste es dividido en unidades estructuralmente independientes confeccionadas con distintos materiales. La elección del material obedece a muchos factores, entre ellos: la facilidad de ser moldeado con precisión, su resistencia estructural, inalterabilidad en contacto con el agua, transparencia, rugosidad, etc. Para llevar a cabo una elección correcta de los materiales a utilizar en la construcción de un modelo hidráulico, conviene conocer las posibilidades de uso de algunos de ellos, específicamente en el campo de la hidráulica experimental, según se resume a continuación*.

La madera puede ser fácilmente moldeada, pero no es transparente y es sensible a cambios en su volumen y forma al estar en contacto con el agua o la humedad. Se recomienda su uso sólo en aquellas partes menos importantes de los modelos en las cuales puede aceptarse pequeñas deformaciones o, en investigaciones no muy prolongadas, con un recubrimiento adecuado. También es utilizada como molde (para dar forma a partes del modelo hechas de plástico), como plantilla (para dar forma al lecho de los modelos fluviales), como encofrado de los elementos de concreto, etc.

* Extractos de la referencia 12 con inclusión de observaciones propias.

Los metales son fácilmente moldeados, cortados, soldados, y además conservan su forma y dimensiones, pero tienen la desventaja de no ser transparentes. El acero es utilizado para la construcción de canales de observación (marcos de refuerzo), conjuntos de tuberías, soportes, compuertas simples, etc. Se considera apropiado el uso de acero inoxidable en las partes más sensibles del modelo y de los dispositivos de medición (superficies vertedoras, piezómetros, etc.), en las cuales la corrosión o el recubrimiento protector tendrían un efecto desfavorable.

Los plásticos pueden ser moldeados mediante distintas técnicas y ofrecen facilidad para ser trabajados de forma similar a la madera dura; además, difícilmente cambian de volumen y forma en contacto con el agua o la humedad, y no son vulnerables a la corrosión. El plexiglás es transparente y puede ser moldeado y prensado al calor; sin embargo, si su uso es muy prolongado puede perder transparencia.

El vidrio es apropiado para la construcción de tuberías transparentes, paredes laterales de canales de observación, aberturas de inspección y ventanas, cubas, piezómetros, tubos, etc. En el caso de formas complicadas o elementos fácilmente rompibles, puede utilizarse plexiglás.

El concreto es muy apropiado para la construcción de modelos de algunas estructuras y tramos fluviales pues es firme y no cambia ni de forma ni de volumen luego de endurecido. La mezcla de concreto o mortero es moldeada con la ayuda de moldes y plantillas de madera, metal, o plástico; su principal desventaja es su alta resistencia inicial de modo que no puede hacerse cambios fácilmente luego de endurecido. Esta desventaja es superada en parte utilizando mezclas especiales que tengan todas las propiedades del mortero de cemento pero que endurezcan lentamente.

Los ladrillos son mayormente utilizados para la construcción de canales de observación temporales y en las paredes exteriores de los modelos tridimensionales y fluviales, utilizando grava y arena como materiales de relleno.

El caucho es utilizado como empaquetadura entre las bridas de las tuberías y en la unión de las partes rígidas de los canales de observación o de los modelos.

Las varias partes del modelo deben poder ser fácilmente colocadas y acopladas y correctamente niveladas y alineadas, utilizándose técnicas de topografía convencionales para su montaje. Las juntas deben ser tratadas adecuadamente a fin de prevenir filtraciones. Puede ser necesario graduar la rugosidad de las superficies del modelo; según sea el caso, se deberá alisar la superficie o, más bien, hacerla más rugosa.

Una técnica utilizada en el caso de modelos fluviales de lecho móvil consiste en construir un lecho fijo suficientemente debajo de la superficie, y sobre éste moldear el lecho móvil insertando plantillas que tienen la forma de las secciones transversales del lecho. Estas plantillas son retiradas luego de moldear el material de lecho. Algunas veces es más apropiado utilizar secciones transversales negativas, es decir, plantillas que tienen forma complementaria a la de la sección transversal requerida, entonces no se insertan en el lecho, más bien se colocan encima. En ambos casos es importante adoptar un nivel de referencia confiable. En los modelos fluviales de lecho fijo también se hace uso de plantillas, se coloca material de relleno, mampostería y enlucido de la rugosidad requerida; en este caso las plantillas quedan embebidas en el lecho fijo.

1.3.2 Detalles al Ingreso y Salida del Modelo Hidráulico

El modelo hidráulico a escala reducida reproduce sólo una porción del prototipo. Esta porción tiene condiciones de contorno —o de borde— que deben ser correctamente reproducidas en modelo para simular que se está reproduciendo *todo* el prototipo. Es por ello importante el ingreso y salida del modelo, que vienen a ser las secciones homólogas de los límites o bordes de la porción de prototipo modelada. En general, estos límites pueden ser escogidos según que contengan la zona que se desea estudiar y que su cercanía a ésta no afecte el fenómeno estudiado. En investigación aplicada debe además considerarse la información disponible.

Al ingreso del modelo debe considerarse la construcción de un tanque de dimensiones suficientemente grandes en el cual se coloca amortiguadores o placas guía para esparcir el flujo sobre toda la sección de entrada del modelo o, en algunos casos, más bien para dirigir el flujo según determinado ángulo; esto dependerá de las condiciones en prototipo. Las placas guía son usualmente de madera, planchas perforadas de metal, ladrillos, o bloques de concreto. Puede también utilizarse filtros, los cuales suelen consistir de un armazón de rejillas de alambre llenado con grava de granulometría adecuada.

La salida del modelo es utilizada para la medición del caudal sólo en casos excepcionales pues el flujo de salida es usualmente dirigido directamente hacia la cisterna del laboratorio. La salida del modelo está provista de un mecanismo para establecer o regular el nivel de agua aguas abajo del modelo para distintos caudales. Esta regulación del nivel de agua es llevada a cabo manual o automáticamente. El control manual es conveniente en experimentos aislados con caudal constante, mientras que los sistemas de control automático serían apropiados para experimentos con caudal (o nivel de agua) variable en el tiempo. Para el control aguas abajo de los niveles de agua puede utilizarse una compuerta posterior tipo vertedero simple u otras más elaboradas.

1.3.3 Diseño del Modelo Hidráulico a Escala Reducida

En general, el procedimiento a seguir para diseñar el modelo físico a escala reducida es el siguiente:

1. Se identifica cuáles serían las variables que participarían en la solución del problema y se agrupan en forma adimensional: trabajar con parámetros adimensionales permite reducir el número de pruebas a efectuar pues en lugar de cambiar cada variable independiente sobre determinado rango, se cambia cada parámetro adimensional (el número de parámetros adimensionales es inferior al número de variables).

2. Los parámetros adimensionales obtenidos y el análisis de trabajos efectuados por otros investigadores al estudiar problemas similares, si hubieren, servirán para establecer los criterios y condiciones de similitud pertinentes y elaborar un análisis teórico, si posible. Debe tenerse presente que en algunos casos especiales los criterios de similitud son identificados luego de realizar las pruebas, al analizar los resultados.
3. Se determina el grado de esquematización del modelo y, con ello, el tipo de modelo (tridimensional o bidimensional, de lecho fijo o de lecho móvil) o la necesidad de trabajar en más de un modelo (a varias escalas).
4. Los criterios de similitud adoptados y las condiciones limitantes correspondientes, así como las limitaciones impuestas por la capacidad de espacio y equipos del laboratorio hidráulico, permitirán establecer las dimensiones del modelo, lo cual, en el caso de investigación aplicada, corresponde a la determinación de la escala de longitudes.
5. Se elige el material a ser utilizado para la construcción del modelo completo o cada una de sus partes.
6. Se determina los mecanismos más apropiados para la manipulación de las variables que se desea probar.
7. Se define la ubicación del modelo y su empalme con el suministro y colector de agua del laboratorio.
8. Se elaboran los planos necesarios para proceder a la construcción del modelo.

En todo momento debe tenerse en consideración el optimizar la construcción y operación del modelo, así como la instalación de los dispositivos auxiliares y de medición. El éxito o fracaso de la investigación, su costo y demanda de trabajo, depende en gran medida del correcto diseño del modelo [12].

1.3.4 Operación del Modelo Hidráulico

El modelo construido en concordancia con su diseño permitirá efectuar una serie de pruebas programadas. Si bien el diseño del modelo ha tenido como objetivo principal cumplir las condiciones y límites de similitud para una válida reproducción del prototipo, esto debe ser aún verificado antes de iniciar las pruebas. Para ello se lleva a cabo una fase de calibración del modelo: en el caso de investigación aplicada se realizan pruebas con determinados valores de las variables independientes para los cuales se conoce el valor de la variable dependiente en prototipo; de tenerse correspondencia entre la variable dependiente conocida y la observada en modelo, puede iniciarse las pruebas en modelo; de no ser así, debe hacerse ajustes al modelo hasta lograr esta correspondencia. En investigación básica la calibración puede no ser posible ante el poco conocimiento del fenómeno investigado, sin embargo, se verifica que no se produzcan efectos no deseados, como efectos de pared, asimetría del flujo en un modelo bidimensional, y otros.

Para determinar relaciones entre los parámetros adimensionales deducidos para el fenómeno investigado, se debe hacer mediciones que conduzcan a un amplio rango de valores de cada parámetro. Dado que cada parámetro adimensional involucra varias variables, puede escogerse qué variables son más fáciles de manipular, por ejemplo, la velocidad, el tirante de agua, el caudal.

Es recomendable que mientras se efectúan las pruebas los resultados sean continuamente analizados; esto permitirá eliminar resultados erróneos, repetir pruebas —de ser necesario—, o incluso, reducir el número de pruebas necesarias para llegar a una solución. Es por ello importante un acercamiento teórico al problema desde el inicio, saber qué es lo que se está buscando al efectuar las pruebas: un acercamiento puramente experimental a la solución de un problema, sin un análisis teórico, mostraría sólo una relación entre los parámetros hidráulicos observados dentro del rango de experimentos realizados, y, si las fórmulas empíricas halladas no pueden explicarse físicamente, no podrán ser extrapoladas ni generalizadas para otros casos similares de flujo [12].

Capítulo 2

ESTUDIOS PRECEDENTES ACERCA DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA PRODUCIDO POR CHORROS DE AGUA

La investigación pionera sobre erosión producida por un chorro de agua fue llevada a cabo por Hunter Rouse, quien estudió experimentalmente el caso de un chorro vertical que incide sobre un lecho de arena; investigación publicada en 1939. Posteriormente, Emmet Laursen estudió la erosión producida por un chorro horizontal, cuyos resultados fueron publicados en 1952. En 1966 se publicó el estudio de Marion Carstens, quien desarrolló una fórmula empírica para la capacidad de transporte de sedimentos analizando los datos experimentales de Laursen. Hasta entonces, las mediciones habían sido efectuadas utilizando instrumentación *básica*, no por ello menos precisa, habiéndose demostrado mucho ingenio tanto al hacer las pruebas como al efectuar el análisis teórico y post-experimental. En 1980 se publica la investigación de S. Chatterjee y S. Ghosh acerca de la erosión localizada debida a un chorro de pared* horizontal que fluye sobre un solado rígido antes de ingresar a un lecho de arena móvil; en sus pruebas no se varió la longitud del solado. Nik Hassan y Rangaswami Narayanan investigaron el mismo caso pero sí consideraron la variación de la longitud del solado; publicación en 1985. En 1994 se publica los estudios complementarios de S. Chatterjee, S. Ghosh y M. Chatterjee al estudio efectuado por dos de ellos en 1980. En las tres últimas investigaciones se hicieron mediciones al interior del flujo con instrumentación sofisticada.

* Del inglés *wall jet*, son chorros dentro de un fluido que inciden hacia un contorno tangencialmente o en ángulo.

2.1 ESTUDIO DE H. ROUSE (1939)

Hunter Rouse se interesó por establecer cuál sería el criterio de similitud que debiera adoptarse al estudiar experimentalmente fenómenos con transporte de sedimentos (sea transporte de sedimentos de fondo, transporte de sedimentos en suspensión, o el caso de la erosión localizada), pues suponía que el tamaño de las partículas de sedimento no necesariamente debía someterse a la misma escala de reducción que las otras dimensiones lineales del modelo. Efectuó análisis teóricos y experimentales de mucho valor que han servido de base a los numerosos estudios de erosión localizada efectuados hasta el presente. Para la determinación del criterio de similitud aplicable al caso de la erosión localizada investigó el caso de un chorro de agua vertical que impacta sobre un suelo no cohesivo erosionable; se presenta aquí el análisis, procedimiento experimental y resultados obtenidos en su estudio.

2.1.1 Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada

Rouse identificó cuáles serían las variables determinantes en un caso simple de erosión local y, mediante análisis dimensional, agrupó tales variables en parámetros adimensionales que luego estudió experimentalmente. En primer lugar, supuso que si el transporte de los sedimentos produce una interacción fluido – sedimento, su movimiento relativo debe estar representado por las características de velocidad de caída y no por la granulometría del material. Según ello, las variables de sedimento que intervendrían serían: w_m y σ_w (media y desviación estándar de la velocidad de caída de las partículas que componen el material). No incluyó variables de fluido, como peso específico o viscosidad, pues consideró que su efecto se manifiesta en la velocidad de caída. Como variable de flujo escogió la velocidad media V , y como longitud característica una dimensión geométrica a . La erosión la representó mediante su profundidad s , la cual variaría en el tiempo t . Obtuvo la siguiente relación:

$$\frac{s}{a} = \phi \left(\frac{w_m t}{a}, \frac{V}{w_m}, \sigma_w \right)$$

Llevó a cabo entonces el estudio experimental de un caso particular: la erosión producida por un chorro de agua vertical sumergido, a fin de verificar la validez de esta relación y definir los criterios de similitud que regirían tal fenómeno de erosión localizada.

2.1.2 Procedimiento Experimental

En la figura 2.1.1 se muestra un esquema del corte longitudinal del equipo utilizado por Rouse en sus experimentos. Se trata de un tanque de 6 pulg. (15 cm) de ancho alimentado bajo carga de agua constante, en el cual el ingreso de agua se produce en forma de chorro vertical, incidiendo sobre un lecho inicialmente plano de arena preparada. El flujo en este tanque es de tipo bidimensional. El tanque tiene paredes de vidrio (glass panel) sobre una de las cuales se traza el desarrollo de la erosión en el tiempo para luego graficarlo en papel. Se utilizó tres tipos de arena prácticamente uniformes con diámetros medios de 0,296 mm, 0,445 mm y 0,719 mm, y velocidades de caída correspondientes de 3,95 cm/s, 6,59 cm/s y 11,14 cm/s.

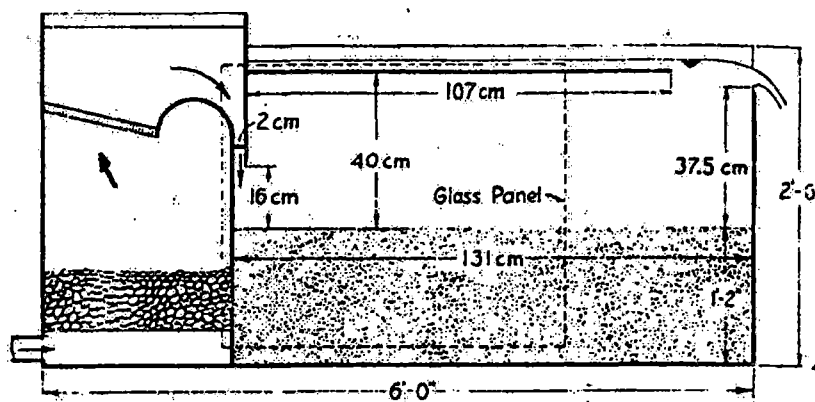


Figura 2.1.1 Esquema del Equipo Experimental

Variando el caudal de ingreso se consiguió un amplio rango de valores de V/w_m para cada arena, con corridas que duraron hasta 24 horas en algunos casos. La longitud característica, a , adoptada ha sido la altura de la salida del chorro respecto al nivel del lecho inicial (16 cm). Se trabajó con una segunda escala, reduciendo a la mitad todas las longitudes, excepto el ancho del tanque (en este segundo caso $a = 8$ cm).

En la figura 2.1.2 se muestra los perfiles de erosión obtenidos para una corrida, los cuales son típicos. Dado que el flujo es bidimensional, se obtiene perfiles de erosión también bidimensionales; cada perfil consta de una parte erosionada e inmediatamente aguas abajo de esta erosión se produce una acumulación de material que suele ser denominada duna. Rouse observó un incremento constante en las dimensiones lineales del perfil de erosión al duplicarse el tiempo transcurrido desde el inicio; sin embargo, transcurrido cierto tiempo, observó también un incremento abrupto cuyo análisis reveló que el proceso de erosión se producía en dos regímenes: al inicio el chorro es desviado en casi 180° pero a medida que la erosión se profundiza, el chorro se adapta al contorno del perfil de erosión, según su talud. Se observó que el chorro podía pasar de un régimen a otro continuamente.

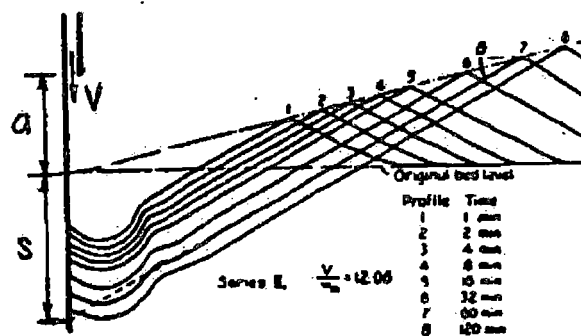


Figura 2.1.2 Desarrollo del Perfil de Erosión en el Tiempo

La profundidad de erosión s está dada por la intersección de una línea tangente a la duna —cerca a su cresta— con el contorno vertical del chorro.

2.1.3 Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales

En la figura 2.1.3 se muestra los resultados obtenidos por Rouse en gráficos s/a versus $\log (w_m t/a)$. El análisis de estos gráficos permitió deducir que la pendiente de las curvas es directamente proporcional a $(V/w_m - 1)$. También se observó que todas las curvas con igual V/w_m se superponen si son desplazadas horizontalmente en una cantidad proporcional a $\log (w_m)$.

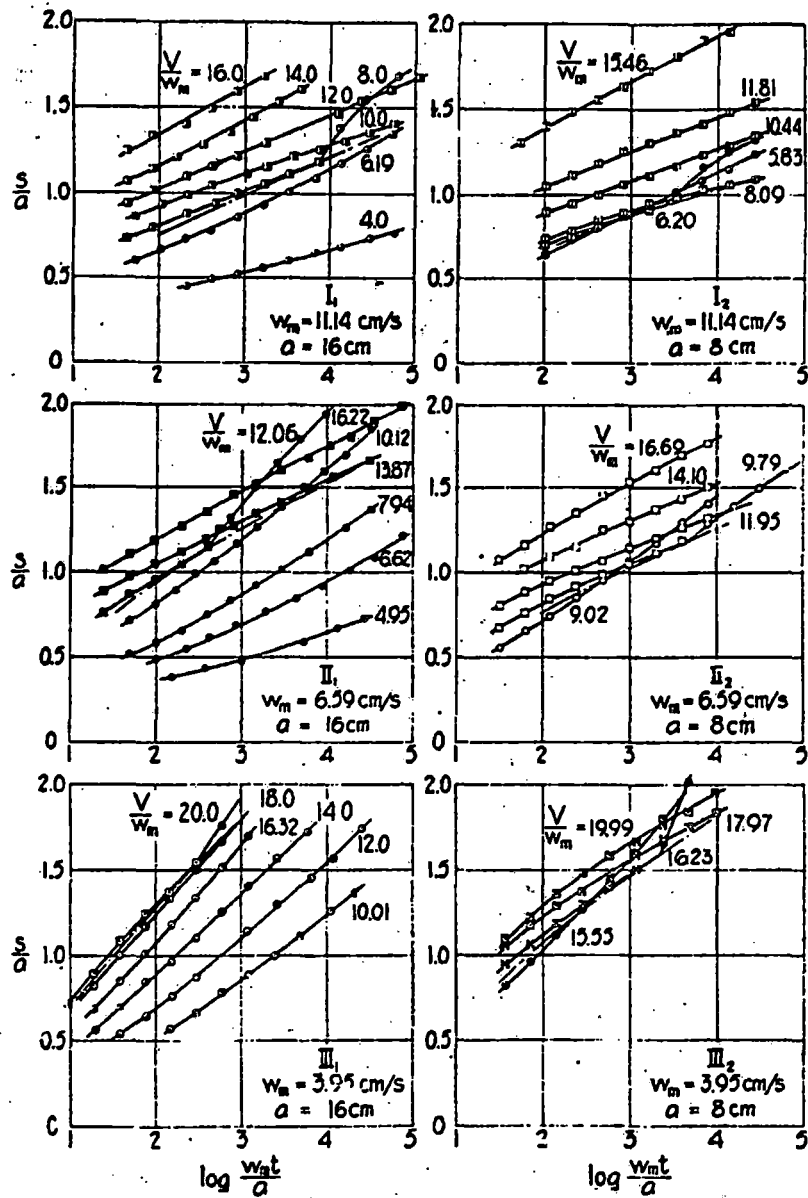


Figura 2.1.3 Resultados Experimentales Graficados

El desplazamiento y la modificación de la pendiente de todas las curvas se muestra en la figura 2.1.4 para los dos regímenes; se verifica entonces que existe una relación entre los parámetros adimensionales establecidos al inicio, previa inclusión de un factor con dimensiones de velocidad, v , cuyo valor en estos experimentos se halló debía ser 5,25 para que las curvas pasen por el origen pero que no cuenta con explicación física definida.

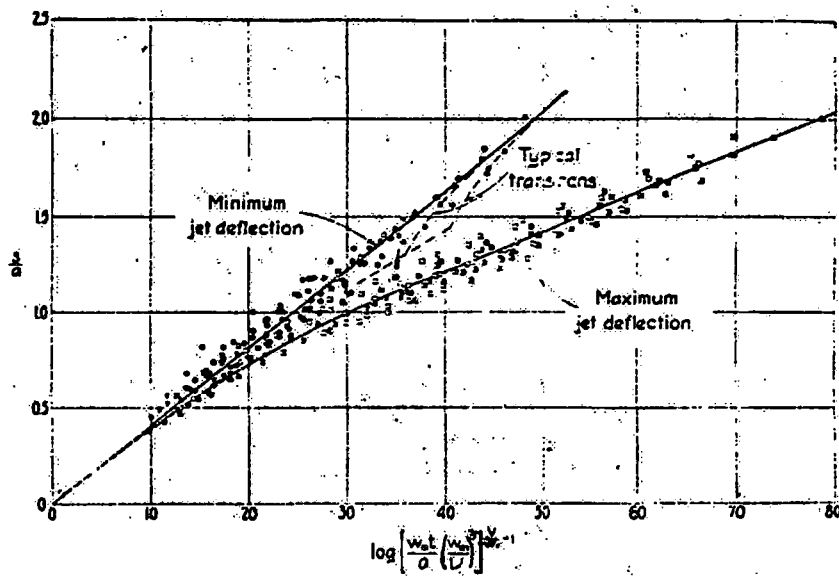


Figura 2.1.4 Resultados Experimentales Graficados

Los experimentos realizados, sin variación del parámetro σ_w , indican entonces como único criterio de similitud para el patrón de erosión estudiado, el parámetro:

$$\left[\frac{w_m t}{a} \left(\frac{w_m}{v} \right)^3 \right]^{1/3} w_m^{-1}$$

Queda claro que debe haber concordancia de régimen entre modelo y prototipo. Aunque se supone que la forma matemática de este parámetro variará al cambiar la geometría y tipo de chorro, se espera que cada una de las fracciones adimensionales incluidas siga siendo factor importante en el fenómeno.

2.2 ESTUDIO DE E. LAURSEN (1952)

2.2.1 Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada

Laursen dedujo las siguientes características generales, las cuales consideró básicas para cualquier análisis detallado de erosión localizada:

1. La velocidad de erosión será igual a la diferencia entre la capacidad de transporte desde el área erosionada y la velocidad de ingreso de sedimentos a tal área.
2. La velocidad de erosión disminuirá al agrandarse la sección de flujo.
3. La extensión de la erosión tiene un límite.
4. Este límite será aproximado asintóticamente.

La primera característica puede ser escrita como una ecuación de erosión:

$$\frac{d}{dt}[f(C)] = g(C) - S$$

C es una descripción matemática del contorno; así el término a la izquierda es la velocidad de erosión, $g(C)$ es la capacidad de transporte en función de la posición del contorno, y S es la velocidad de ingreso de sedimentos. Esta ecuación puede ser aplicada a una situación específica si se conoce S y $g(C)$; si se conociese la relación entre la capacidad de transporte y la distribución de velocidades cerca al contorno, y si se tuviese métodos para especificar el patrón de flujo para cualquier condición de contorno, la ecuación de erosión podría ser usada para resolver cualquier problema de erosión. En la mayoría de casos no se cuenta con tal relación y métodos de modo que se recurre a aproximaciones y la experimentación.

2.2.2 Procedimiento Experimental

En la figura 2.2.1 se muestra un esquema del equipo experimental utilizado por Laur- sen (las medidas figuran en pies). En este caso el agente erosivo es un chorro de agua sumergido, casi horizontal, de no ser por una pestaña (lip) colocada en la parte superior de la ranura por la que sale el chorro para restringir su oscilación. Los perfiles de erosión se obtuvieron mediante fotografías, con indicación del tiempo mediante un reloj. Se utilizó tres tipos de arena casi uniformes con diámetros medios de 0,24 mm, 0,69 mm, 1,60 mm, y velocidades de caída de 3,6 cm/s, 11,7 cm/s y 25,6 cm/s.

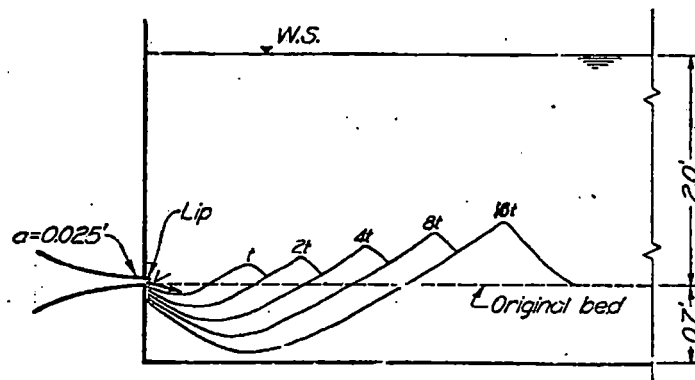


Figura 2.2.1 Esquema del Equipo Experimental y de los Perfiles de Erosión

Para demostrar que la erosión tiene un límite, Laursen hizo lo siguiente: para una dimensión dada del perfil de erosión, redujo la velocidad del flujo hasta que las partículas de arena no se desplazaran fuera de la zona erosionada.

De otro lado, para medir la capacidad de transporte correspondiente a una condición de contorno (dimensión del perfil de erosión), se efectuaron pruebas con ingreso de sedimentos a una velocidad controlada. Se observó entonces el desarrollo del perfil de erosión: la duna se desplazaba hacia aguas abajo de manera similar a las pruebas sin ingreso de sedimentos, pero al alcanzarse una velocidad de remoción de arena desde la zona erosionada igual a la velocidad de ingreso de sedimentos, la cara aguas arriba de la duna empezaba a desplazarse hacia aguas arriba.

2.2.3 Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales

Nuevamente se observó incrementos constantes en las dimensiones del perfil de erosión al duplicarse el tiempo transcurrido desde el inicio. También se observó similitud de forma en los perfiles de erosión, según puede observarse en la figura 2.2.2, donde se muestra un gráfico adimensional con los perfiles de erosión de una corrida superpuestos (X_D es la distancia horizontal desde la ranura hasta la cresta de la duna). Se observó que los perfiles adimensionales de todas las corridas con la misma arena eran casi idénticos y al comparar con las demás arenas se encontró diferencias muy leves.

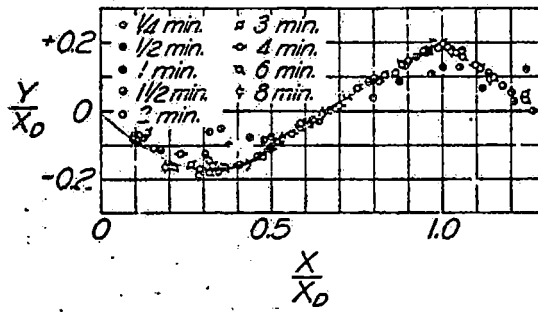


Figura 2.2.2 Similitud de los Perfiles de Erosión

Dada la similitud hallada en los perfiles de erosión, Laursen adoptó como dimensión característica la distancia X_D . En la figura 2.2.3 se presenta la variación de la erosión en el tiempo usando parámetros adimensionales, similar a lo efectuado por Rouse.

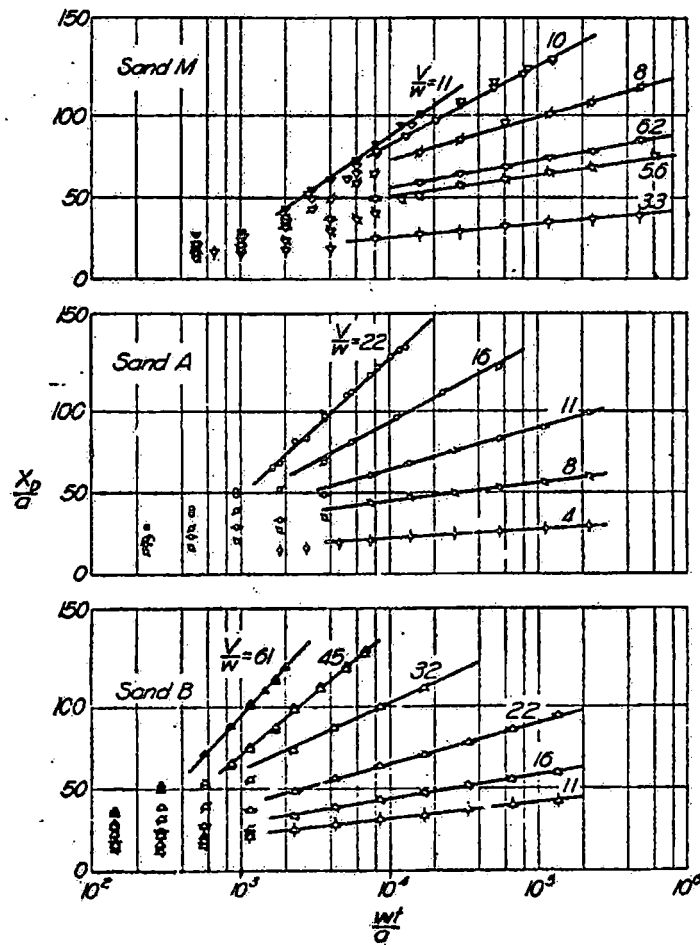


Figura 2.2.3 Resultados Experimentales Graficados

Luego de una etapa inicial en el desarrollo del perfil de erosión, los resultados muestran una variación lineal, lo cual pareciera indicar que no se alcanza un límite finito. Haciendo uso de las mediciones en las que sí se alcanzó un límite para el proceso de erosión, se obtuvieron los datos mostrados en la figura 2.2.4, donde X_L es el valor de X_D en el límite.

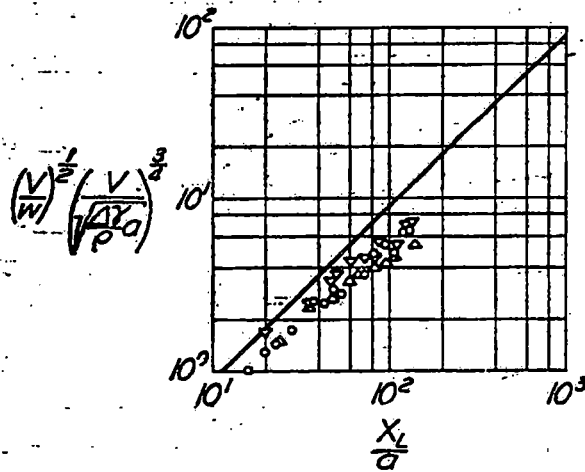


Figura 2.2.4 Límite de Erosión

Los gráficos así obtenidos demuestran que la variación de las dimensiones del perfil de erosión en el tiempo es una función aproximadamente logarítmica sobre un cierto rango pero que se aproxima a un límite finito.

Con los valores obtenidos en las pruebas con ingreso de sedimentos, se obtuvo el gráfico que se muestra en la figura 2.2.5.

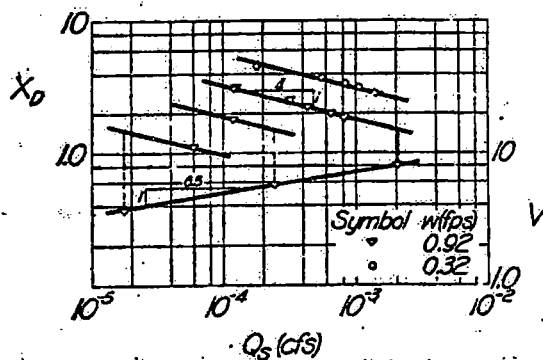


Figura 2.2.5 Capacidad de Transporte

La capacidad de transporte, en este caso, estaría dada entonces por la expresión:

$$\frac{Q_s}{B} = \frac{K_c V^{6,5}}{w^2 X_D^4}$$

K_c es una constante dimensional y B es el ancho del canal.

De otro lado, establecida la similitud de forma en los perfiles de erosión, la velocidad de erosión por unidad de ancho puede expresarse como:

$$\frac{d}{dt} [f(C)] = \frac{dA}{dt} = K_s \frac{d(x_D^2)}{dt}$$

K_s es una constante que se obtiene a partir de los perfiles de erosión adimensionales.

Reemplazando estas dos últimas ecuaciones en la ecuación de erosión, incluyendo el límite X_L para el cual la capacidad de transporte es cero, se obtiene:

$$K_s \frac{d(X_D^2)}{dt} = \frac{K_c V^{6,5}}{w^2} \left(\frac{1}{X_D^4} - \frac{1}{X_L^4} \right)$$

función que puede ser integrada para obtener:

$$f\left(\frac{X_D}{X_L}\right) = -\left(\frac{X_D}{X_L}\right)^2 + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + (X_D/X_L)^2}{1 - (X_D/X_L)^2} \right] = \frac{K_c V^{6,5}}{K_s w^2 X_L^6} t$$

Reemplazando la relación deducida a partir de sus mediciones (figura 2.2.4):

$$X_L = c_1 \alpha \left(\frac{V}{w} \right)^{1/2} \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta \gamma}{\rho}} \alpha} \right)^{3/4}$$

Se obtiene:

$$f\left(\frac{X_D}{X_L}\right) = c_2 \frac{w/a}{K_s V / \sqrt{a \Delta \gamma / \rho}} t$$

Utilizando este parámetro adimensional de tiempo, Laursen obtuvo finalmente el gráfico de la figura 2.2.6.

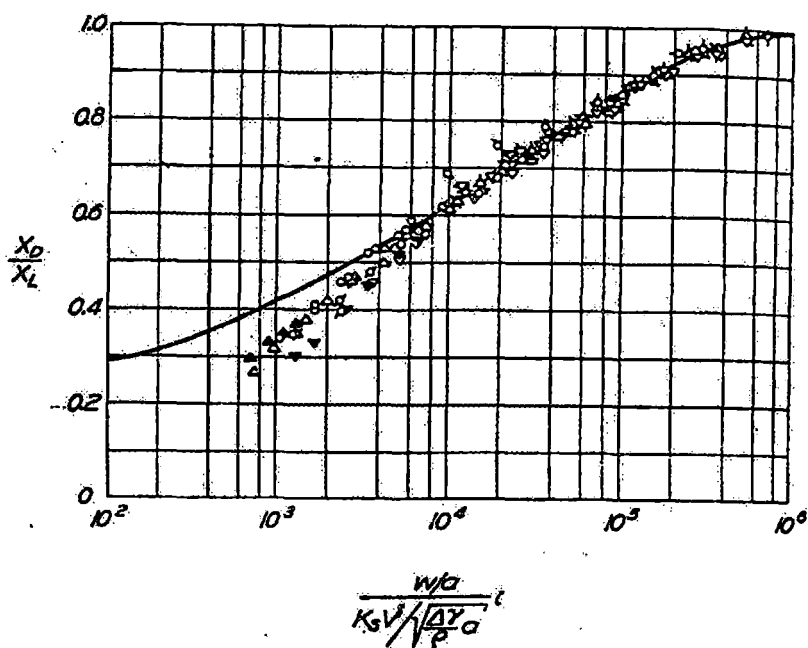


Figura 2.2.6 Resultados Experimentales Graficados

Los resultados de Laursen demuestran el cumplimiento de las características generales establecidas por él para el proceso de erosión; ello permite reducir el problema de erosión a: determinar los patrones de flujo y determinar la relación entre el patrón de flujo y su capacidad de transporte.

Una observación dada por Parsons —luego de la publicación del estudio de Laursen— es que la velocidad de caída representa el efecto de las cualidades del material de lecho siempre que el modo de transporte sea en suspensión y que este se deba a las componentes verticales del flujo; Parsons consideraba que si el transporte ocurre en proximidad al lecho, los investigadores debieran buscar una expresión más realista para representar el efecto del material de lecho sobre el proceso.

2.3 ESTUDIO DE M. CARSTENS (1966)

Carstens estudió varios casos de erosión localizada que habían sido ensayados en laboratorio por otros investigadores para definir los criterios de similitud que rigen el fenómeno en general. Era claro que no podía obtenerse una función de transporte de sedimentos general para erosión localizada pues esta depende de la geometría de la obstrucción que produce las regiones de flujo no uniforme que la provocan; sin embargo, consideró que podría agruparse las variables de fluido, sedimento y flujo separadamente de las variables geométricas, de modo que sea la relación funcional entre el parámetro de transporte y los parámetros geométricos la que varíe entre los diferentes casos de erosión localizada, mientras que la relación funcional entre el parámetro de transporte de sedimentos y el parámetro que contiene las variables de fluido, sedimento y flujo sea la misma.

2.3.1 Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada

Analizando lo que sucede en una partícula individual sobre la superficie del lecho, puede asumirse que la capacidad de transporte es función de las fuerzas de arrastre y sustentación que ejerce el flujo sobre la partícula (fuerza actuante) y de su peso relativo (fuerza resistente).

$$F_A = \sqrt{C_D^2 + C_L^2} K_1 d^2 \frac{\rho v^2}{2}$$

F_A es la fuerza actuante, C_D es el coeficiente de arrastre de la partícula, C_L es el coeficiente de sustentación de la partícula, K_1 es un factor de forma adimensional relacionado al área proyectada de la partícula, d es el diámetro de la partícula, ρ es la densidad del agua y v es la velocidad del fluido adyacente al lecho.

$$F_R = (\gamma_s - \gamma) K_2 d^3$$

F_R es el peso efectivo de la partícula, γ_s es el peso específico de la partícula, γ es el peso específico del agua y K_2 es un factor de forma adimensional relacionado al volumen de la partícula.

La relación entre la fuerza actuante y la fuerza resistente sería:

$$\frac{F_A}{F_R} = \frac{K_1 \sqrt{C_L^2 + C_D^2}}{K_2} \frac{v^2}{\Delta g d}$$

Los factores de forma K_1 y K_2 son variables de sedimento independientes de la situación de flujo. Los coeficientes C_D y C_L son considerados también variables de sedimento independientes de la situación de flujo porque en las zonas de erosión activa las velocidades son altas y el espesor de la capa límite es despreciable. Entonces,

$$\frac{F_A}{F_R} = [f(\text{geometría de la partícula de sedimento})] N_s^2$$

$N_s = v/\sqrt{\Delta g d}$ es denominado número de sedimento.

Si bien la capacidad de transporte —entendiéndose como transporte lo que efectivamente sale de la zona erosionada— dependería también de la forma del perfil de erosión, esta a su vez depende de la geometría del elemento perturbador (obstrucción) y de la geometría de las partículas de sedimento; esto último debido a que en la zona erosionada se produce movimiento de partículas que no llegan a salir de esta y, por el contrario, regresan deslizándose por las paredes del perfil formando taludes prácticamente iguales al ángulo de reposo de la mezcla de sedimentos. Asimismo, la capacidad de transporte disminuye al incrementarse la profundidad de erosión s , pues los límites del perfil de erosión se alejan de la zona perturbada.

Según estas consideraciones, Carstens establece la siguiente hipótesis:

$$\frac{Q_s}{v B d} = f\left(\left(N_s^2 - N_{sc}^2\right), \frac{s}{L}, \text{geometría de obstrucción, geometría partícula de sedimento}\right)$$

Q_s es la capacidad de transporte, N_{sc} es el valor mínimo del número de sedimento para el cual se producirá erosión, B es el ancho de la zona erosionada, y L es una dimensión elegida de la obstrucción. La elección de utilizar el diámetro de partícula d , en lugar del tirante de flujo en la descarga de referencia vBd (término a la izquierda) obedece a que se considera que el desprendimiento de la partícula del lecho y su transporte dependen sólo de las condiciones de flujo cerca del lecho, siempre que el tirante de flujo no sea muy pequeño.

La validez de la relación establecida por Carstens, habiendo escogido las variables que a su juicio eran más importantes, fue determinada analizando datos de diferentes experimentos de erosión localizada con diferentes tipos de obstrucción de flujo: geometría de erosión fija, erosión en dunas, erosión debida a un chorro bidimensional, erosión alrededor de un cilindro vertical y erosión alrededor de un cilindro que yace sobre el lecho. Para la presente investigación resulta relevante el análisis de la erosión debida a un chorro bidimensional, el cual fue efectuado utilizando los datos del experimento de E. Laursen (1952) descrito precedentemente.

2.3.2 Análisis de los Datos Obtenidos por E. Laursen (1952)

Carstens no consideró el periodo inicial de erosión en el cual no se tenía aún similitud geométrica del perfil de erosión y esquematizó el perfil de erosión según la configuración mostrada en la figura 2.3.1.

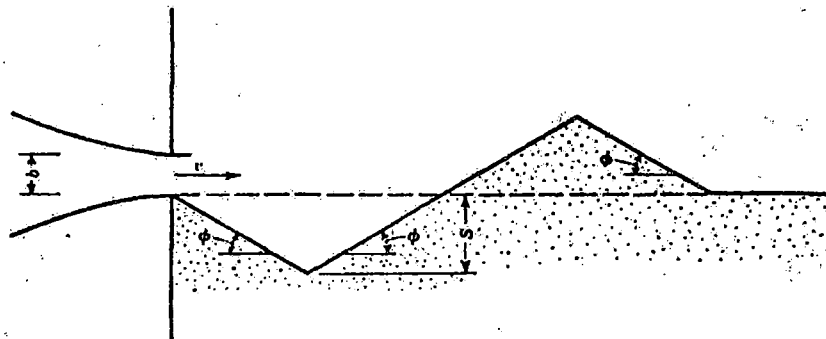


Figura 2.3.1 Esquema del Perfil de Erosión

En el caso de erosión sin ingreso de sedimentos, la capacidad de transporte es igual a la velocidad de erosión o velocidad de cambio del volumen del perfil de erosión, es decir:

$$Q_s = \frac{dV}{dt}$$

En el perfil de erosión esquematizado:

$$\frac{Q_s}{B} = \frac{4}{\operatorname{tg}\phi} s \frac{ds}{dt}$$

Utilizando los resultados experimentales de Laursen, s versus t , se calculó la capacidad de transporte, Q_s , y se elaboró el gráfico mostrado en la figura 2.3.2.

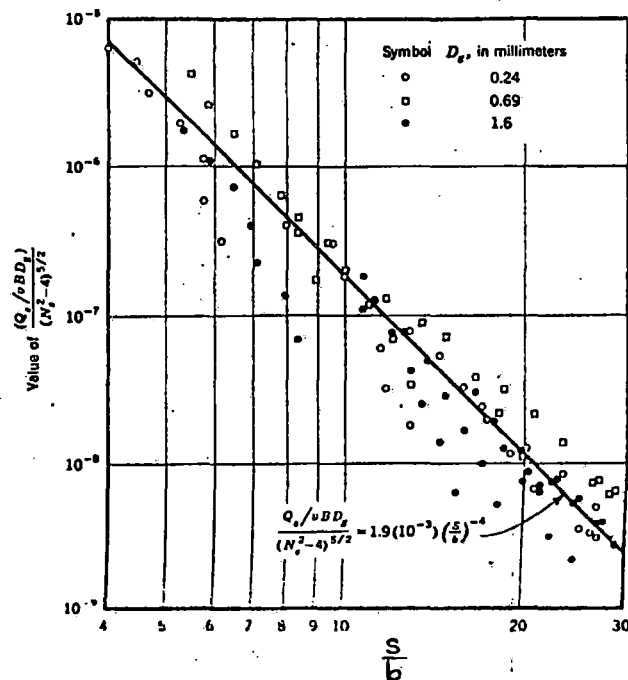


Figura 2.3.2 Capacidad de Transporte del Chorro Bidimensional

La velocidad de referencia v es la velocidad de salida del chorro; la dimensión elegida de la obstrucción L es el ancho de la abertura o ranura b ; el ancho de la zona erosionada B es el ancho del canal pues la erosión es bidimensional.

Se halló entonces la siguiente aproximación empírica:

$$\frac{Q_s}{vBd} = 1,9 \cdot 10^{-3} (N_s^2 - 4)^{5/2} \left(\frac{s}{b}\right)^{-4}$$

Utilizando la relación entre Q_s y s , se obtiene:

$$\frac{\left(\frac{s}{b}\right)^5}{\operatorname{tg}\phi} \frac{d\left(\frac{s}{b}\right)}{d\left(\frac{vt}{b}\right)} = 4,75 \cdot 10^{-4} (N_s^2 - 4)^{5/2} \left(\frac{d}{b}\right)$$

Integrando se llega a la siguiente expresión:

$$\left(\frac{s}{b}\right)^6 = 2,85 \cdot 10^{-3} (N_s^2 - 4)^{5/2} \operatorname{tg}\phi \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{vt}{b}\right) + C$$

La constante de integración C es determinada por condiciones iniciales. En la figura 2.3.3 se muestra los datos de una corrida de Laursen con superposición de la ecuación de erosión deducida.

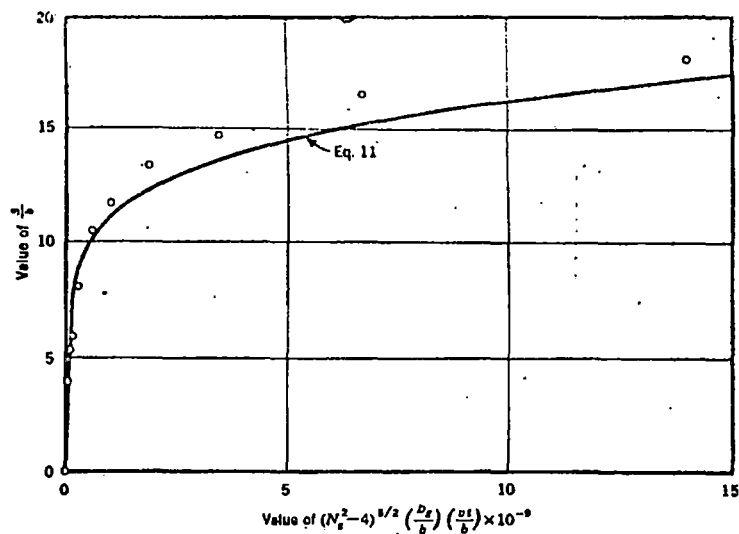


Figura 2.3.3 Variación de la Profundidad de Erosión en el Tiempo

Carstens concluye que bajo los supuestos:

- a) la velocidad y distribución de velocidades en la zona de erosión localizada son resultado del obstáculo o elemento perturbador
- b) no hay presencia de ondas de gravedad
- c) no hay ingreso de sedimentos hacia la zona de erosión
- d) no se tiene influencias extrañas sobre el patrón de flujo tales como dunas pasando por la zona erosionada

se cumple lo siguiente:

1. Para la capacidad de transporte:

$$\frac{Q_s}{(N_s^2 - N_{sc}^2)^{5/2} v B d} = f \left(\text{elemento perturbador}, \frac{s}{L}, \text{geometría partículas de sedimento} \right)$$

2. Para la profundidad de erosión:

$$\frac{s}{L} = f \left((N_s^2 - N_{sc}^2)^{5/2} \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{vt}{L} \right), \text{elemento perturbador}, \text{geometría partículas sedimento} \right)$$

2.4 ESTUDIO DE S. CHATTERJEE Y S. GHOSH (1980)

Chatterjee y Ghosh estudiaron el caso de un chorro horizontal bidimensional que fluye sumergido sobre un solado rígido hacia un lecho de arena erosionable. Su objetivo era determinar qué parámetros hidráulicos intervienen en el cálculo del transporte de sedimentos para este caso y así establecer los criterios de similitud pertinentes.

Esta investigación y las sucesivas se distinguen por hacer mediciones al interior del flujo, caracterizando el recorrido del chorro sobre el solado y el perfil de erosión, y su variación en el tiempo.

2.4.1 Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada Estudiado

Los autores consideraron que las características del flujo en el caso estudiado eran similares a las de un chorro de pared en difusión*, como se muestra en la figura 2.4.1. En esta figura el subíndice m denota la sección de erosión máxima. Para analizar esta difusión buscaron describir la variación de los perfiles de velocidad a lo largo del solado rígido y del perfil de erosión; resultaron importantes la velocidad máxima en cada perfil U , y el espesor de la capa límite δ , definida por los autores como la distancia vertical desde el lecho hasta el nivel de velocidad máxima.

Asimismo, fue de su interés describir la distribución de velocidades al interior de la capa límite, en la sección de erosión máxima, y dado que consideraron que el transporte de sedimentos dependería del esfuerzo cortante que actúa sobre el lecho durante el desarrollo del perfil de erosión, utilizaron esta distribución de velocidades en la capa límite para calcular el esfuerzo cortante crítico mediante la ecuación integral de cantidad de movimiento de von Karman.

Principalmente su acercamiento a la solución del problema consistió en efectuar mediciones bastante detalladas que luego procesaron para obtener ecuaciones empíricas que describieran el fenómeno.

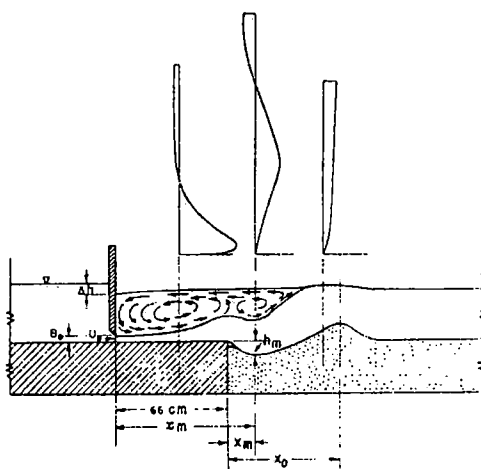


Figura 2.4.1 Chorro en Difusión y Perfiles de Velocidad Típicos

* Los chorros de pared venían siendo estudiados desde los años cincuenta.

Las variables consideradas en el análisis del problema son: la velocidad de salida del chorro U_o , el grosor del chorro B_o , la longitud del solado rígido L , la distancia desde la abertura o ranura x , el tirante de sumergimiento h (medido aguas abajo desde el nivel de lecho plano), la carga de agua que produce el flujo Δh , el caudal por unidad de ancho q , el diámetro medio de las partículas de la superficie d_m , y el tiempo t .

2.4.2 Procedimiento Experimental

En la figura 2.4.2 se muestra un esquema del modelo utilizado por Chatterjee y Ghosh para el estudio del chorro bidimensional sumergido que fluye sobre un solado rígido hacia un lecho erosionable. Utilizaron dos tipos de suelo: arena de diámetro medio 0,76 mm, desviación estándar geométrica 1,22 y velocidad de caída 12,2 cm/s; y grava de diámetro medio 4,30 mm, desviación estándar geométrica 1,43 y velocidad de caída 48,8 cm/s. La longitud de solado rígido es fija: 66 cm.

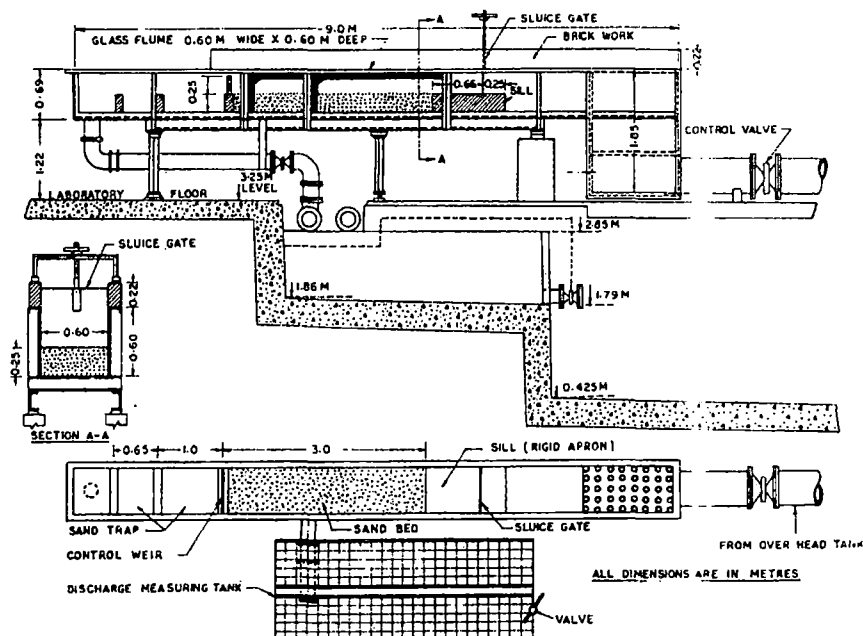


Figura 2.4.2 Esquema del Modelo Utilizado

Se efectuaron pruebas con aberturas de compuerta de 2 cm, 3 cm, 4 cm y 5 cm, y descargas por metro de ancho en el rango de 15,9 a 42,5 l/s. El tirante de sumergimiento (aguas abajo) fue casi constante durante las pruebas, del orden de 30 cm.

En cada corrida se alcanzó un estado de equilibrio: no se observaba mayor movimiento de las partículas de sedimento en la sección de erosión máxima. Para esta condición se midió la distribución de velocidades en varias ubicaciones a lo largo del eje longitudinal del chorro (se utilizó tubo de Pitot), el tiempo requerido para alcanzar tal estado, y el perfil del lecho.

2.4.3 Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales

Para describir las características de difusión del chorro, los autores graficaron los parámetros adimensionales U/U_0 versus x/B_0 obtenidos a partir de sus mediciones, según se muestra en la figura 2.4.3. Para efectos de comparación superpusieron las características de difusión de un chorro libre (free jet). Según se observa, la velocidad comienza a disminuir a una distancia de 5,5 veces la abertura de compuerta en la arena y de 6 veces en la grava. En el chorro libre esto ocurre a 5,2 veces la abertura, según indican los autores. En el solado la disminución de la velocidad es lenta y se acelera al pasar al lecho móvil; la difusión depende del material de lecho móvil.

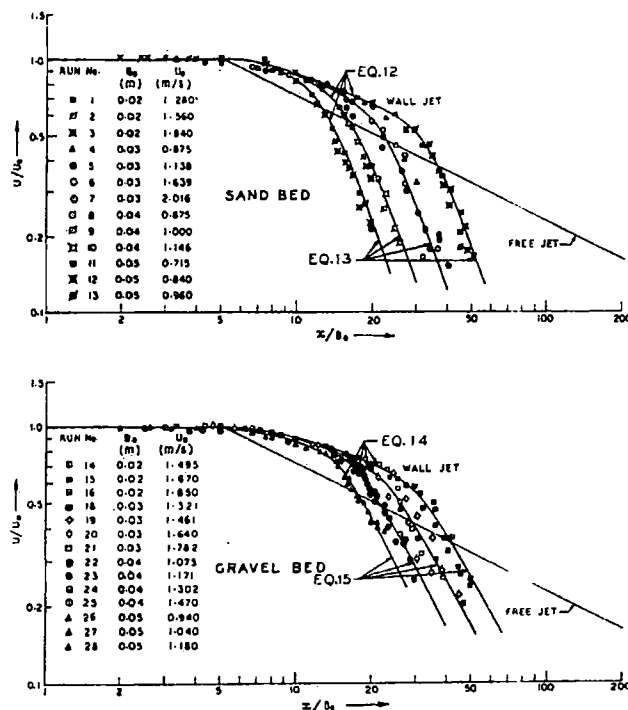


Figura 2.4.3 Difusión del Chorro

Los perfiles de velocidad medidos a lo largo del solado rígido en algunas corridas fueron comparados con el perfil de velocidades de un chorro de pared clásico (de contorno fijo). El gráfico adimensional correspondiente se muestra en la figura 2.4.4. Se indica que la diferencia entre ambos se debe a la introducción del lecho móvil.

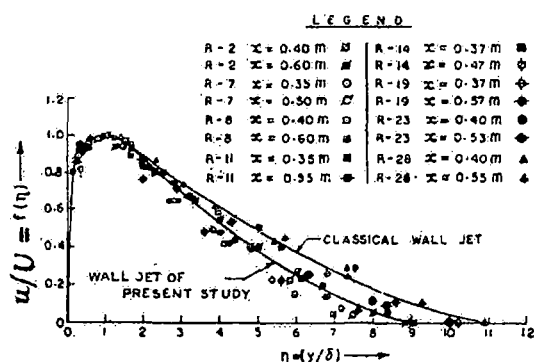


Figura 2.4.4 Distribución de Velocidades en el Solado Rígido

Según Hassan y Narayanan [6] es posible que el tirante de sumergimiento finito y la distorsión del lecho erosionable en la extensión dada en los experimentos de Chatterjee y Ghosh, haya producido condiciones aguas arriba —específicamente de flujo regresivo— considerablemente diferentes a las del chorro de pared clásico. En todo caso, la diferencia se produce en la región externa del perfil de velocidades y, en la región interna —donde la fricción del contorno tiene efecto— hay concordancia.

Chatterjee y Ghosh obtuvieron además relaciones para el perfil de velocidades al interior de la capa límite en la sección de erosión máxima y para la condición de equilibrio. Como se ha indicado, estas relaciones y las obtenidas para la velocidad máxima y el espesor de la capa límite, permitieron estimar el esfuerzo cortante crítico haciendo uso de la ecuación integral de cantidad de movimiento de von Karman. Los autores hicieron algunas comparaciones de sus resultados con los obtenidos haciendo uso del diagrama de Shields y encontraron algunas discrepancias; los autores aceptan cierto grado de incertidumbre respecto a la aplicabilidad de ambos métodos.

Las expresiones empíricas deducidas por Chatterjee y Ghosh pueden ser consultadas en la referencia 4.

2.5 ESTUDIO DE N. HASSAN Y R. NARAYANAN (1985)

El caso estudiado es *similar* al estudiado por Chatterjee y Ghosh; se trata de la erosión localizada producida por un chorro de pared que fluye sobre un solado rígido hacia un lecho de arena no cohesiva. Una diferencia que debe mencionarse es que en las pruebas realizadas se utilizaron aberturas de compuerta pequeñas comparadas con el tirante de sumergimiento, posiblemente en atención a la observación al estudio de Chatterjee y Ghosh, respecto a la conveniencia de que el chorro sea bien sumergido si se desea que se comporte como un chorro de pared clásico a lo largo del solado.

Hassan y Narayanan efectuaron también mediciones al interior del flujo y, basándose en la similitud de forma del perfil de erosión, que ha sido observada por varios investigadores y verificada por ellos, razonaron lo siguiente: si determinadas variables de flujo y sedimento producen un perfil de erosión en un tiempo dado, otro juego de variables producirá ese mismo perfil de erosión en menor o mayor tiempo. Este razonamiento fue utilizado por los autores para escoger sólo algunos perfiles de erosión y hacer mediciones en su interior para varias condiciones de flujo.

Los autores elaboraron una teoría, a la que denominaron semi – empírica, para evaluar la variación de la erosión en el tiempo.

2.5.1 Análisis del Fenómeno de Erosión Localizada Estudiado

Hassan y Narayanan consideraron que las partículas de arena a lo largo del contorno del perfil de erosión estarían sometidas a la acción de fuerzas de fluido proporcionales al cuadrado de alguna velocidad característica, escogida como la velocidad máxima U_m en la sección vertical que pasa por la posición de máxima profundidad de erosión s . Si el potencial de erosión es proporcional a la relación entre la fuerza del fluido y el peso sumergido de los sedimentos, puede escribirse lo siguiente para la velocidad de erosión:

$$\frac{ds}{dt} = \beta U_m \left[\frac{U_m^2}{\Delta g d} \right]$$

β es un coeficiente adimensional. Las demás variables han sido definidas anteriormente.

Esta ecuación asume que todos los sedimentos desprendidos del lecho son removidos de la zona erosionada y depositados aguas abajo, lo cual no se cumple pues algunos sedimentos no llegan a salir de la zona erosionada.

Consideraron entonces que la fracción de sedimentos que abandonará efectivamente la zona erosionada es proporcional a alguna potencia r de la relación entre la energía cinética de los sedimentos al desprenderse del lecho y la energía potencial en la elevación máxima del perfil de erosión. Si se asume que la energía cinética mencionada es proporcional a la masa de las partículas de arena por el cuadrado de la velocidad U_m , y la energía potencial correspondiente a la elevación máxima del perfil de erosión —teniendo en cuenta la similitud observada en los perfiles de erosión— es del orden de $\Delta g s$ veces la masa, entonces la ecuación de velocidad de erosión se modifica del siguiente modo:

$$\frac{ds}{dt} = \beta_1 \left[\frac{U_m^2}{\Delta g s} \right]^r U_m \left[\frac{U_m^2}{\Delta g d} \right]$$

β_1 es un coeficiente adimensional. Ordenando las variables se obtiene:

$$\frac{1}{(r+1)} \frac{d}{dt} [s^{r+1}] = \beta_1 \left[\frac{U_m^2}{\Delta g} \right]^r U_m \left[\frac{U_m^2}{\Delta g d} \right]$$

Esta expresión debe ser integrada para obtener s en función del tiempo. La condición inicial es $s = 0$ para $t = 0$ y debe probarse varios valores de r y β_1 que permitan un buen ajuste con los resultados experimentales. U_m es obtenido a partir de relaciones empíricas desarrolladas por los autores para el caso.

2.5.2 Procedimiento Experimental

Las pruebas experimentales han sido ejecutadas en un canal de observación de 91,5 cm de ancho y 3,9 m de largo. En la figura 2.5.1 se muestra un esquema simple del modelo. El lecho de arena tiene un espesor de 11,8 cm y se han ensayado arenas casi uniformes de 1,65 mm; 0,8 mm; y 0,5 mm de diámetro medio. La compuerta deslizante podía desplazarse de modo que su distancia al extremo del solado variara en el rango de 20,0 cm a 56,5 cm. Las aberturas de compuerta produjeron chorros de 0,59 cm a 1,53 cm de grosor, y el tirante de sumergimiento se mantuvo en el orden de 30 cm.

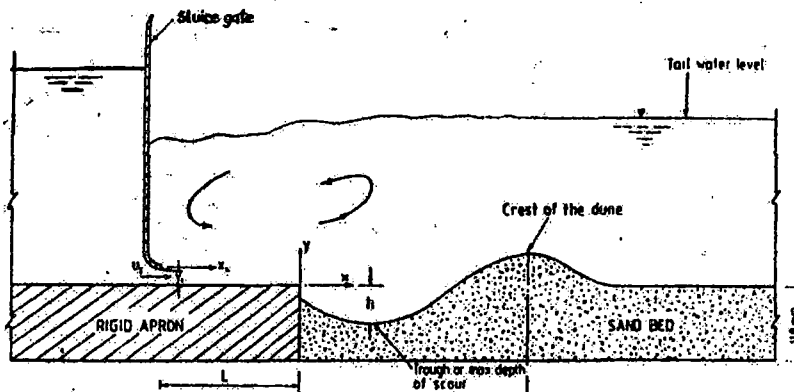


Figura 2.5.1 Esquema del Caso Estudiado

La profundidad de erosión fue medida con un equipo ultrasónico que mide el tiempo que demora una onda ultrasónica en hacer el recorrido transmisor – receptor en agua. El tiempo transcurrido está relacionado con la profundidad de erosión por calibración. Se llevaron a cabo mediciones de la profundidad de erosión a varias distancias aguas abajo del solado obteniéndose perfiles de erosión para varios instantes de tiempo. Cabe indicar que con el equipo de medición utilizado la medición del perfil de erosión podía efectuarse en tiempo real, sin detener el funcionamiento del modelo, reduciendo significativamente el trabajo y tiempo empleado.

Los autores no lograron hacer mediciones en estado de equilibrio puesto que la profundidad de lecho móvil con la que trabajaron no fue suficiente. En su opinión, el equilibrio se conseguiría sólo con tirantes de sumergimiento altos, donde el efecto del crecimiento de la duna del perfil de erosión sería mínimo.

Se midieron perfiles de velocidad a lo largo del solado rígido y, dada la dificultad de realizar mediciones de las características del flujo al interior de la zona en erosión, se llevaron a cabo mediciones sobre cinco perfiles de erosión rígidos. Para obtener estos perfiles rígidos se forma el perfil de manera natural, se detiene la prueba y se dreña, entonces se aplica un recubrimiento sobre el lecho deformado para que endurezca. Las mediciones se efectuaron en un mismo perfil para varias condiciones de velocidad del chorro, abertura de compuerta y longitud de solado. En total se hicieron 26 mediciones con los cinco perfiles de erosión seleccionados. Para todas las mediciones de velocidad se utilizó un tubo de Pitot.

2.5.3 Análisis y Discusión de los Resultados Experimentales

En la figura 2.5.2 se muestra los perfiles de erosión de una corrida, mostrando nuevamente incrementos constantes en sus dimensiones lineales para lapsos de tiempo del doble. Para verificar la similitud de forma en los perfiles de erosión —según había sido hallado por otros investigadores— se procedió a graficar los perfiles de manera adimensional, tomando la distancia horizontal desde el extremo final del solado hasta la cresta de la duna (X_D) como factor de escala de longitud. Dos de estos gráficos se muestran en la figura 2.5.3 a efectos de observar la influencia de la escala de tiempo y de la longitud del solado. Observaron que la longitud de solado sí parece tener un ligero efecto sobre la similitud de forma del perfil de erosión en la región aguas abajo de la máxima profundidad de erosión.

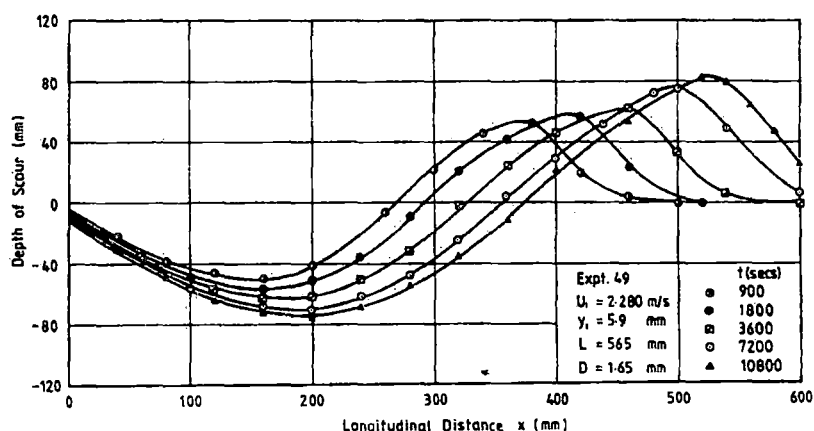


Figura 2.5.2 Desarrollo de los Perfiles de Erosión en el Tiempo

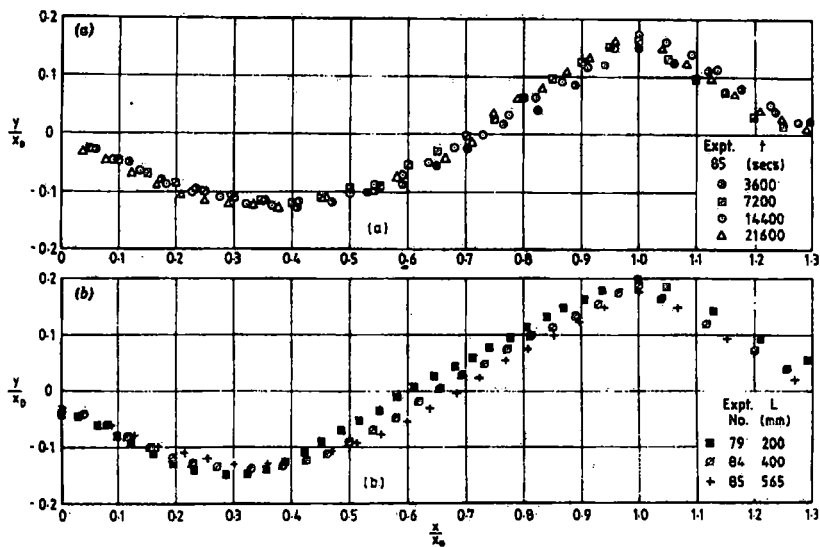


Figura 2.5.3 Perfiles de Erosión Adimensionales
a) Tiempo variable; b) Longitud de solado variable

En la figura 2.5.4 se muestra en forma adimensional los perfiles de velocidad obtenidos en varias posiciones a lo largo del solado. En la figura, U es la velocidad a una distancia vertical y y desde el solado; U_m es la velocidad máxima del perfil, y para $y=y_2$, $U = U_m/2$. Los resultados de Glauert indicados en la figura corresponden al chorro de pared clásico. Según puede observarse, los perfiles de velocidad sobre el solado muestran similitud entre sí y con el chorro de pared clásico, para este caso.

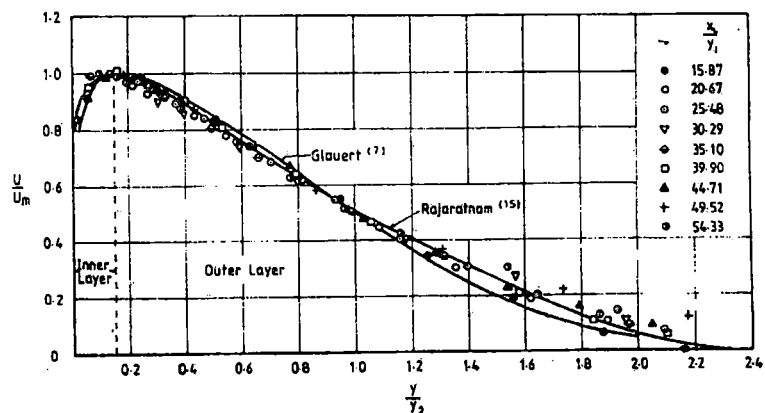


Figura 2.5.4 Distribución de Velocidades en el Solado

Los autores también dedujeron una expresión empírica para la variación de la velocidad máxima a lo largo del solado que puede ser revisada en la referencia 6 y cuyo gráfico se muestra en la figura 2.5.5.

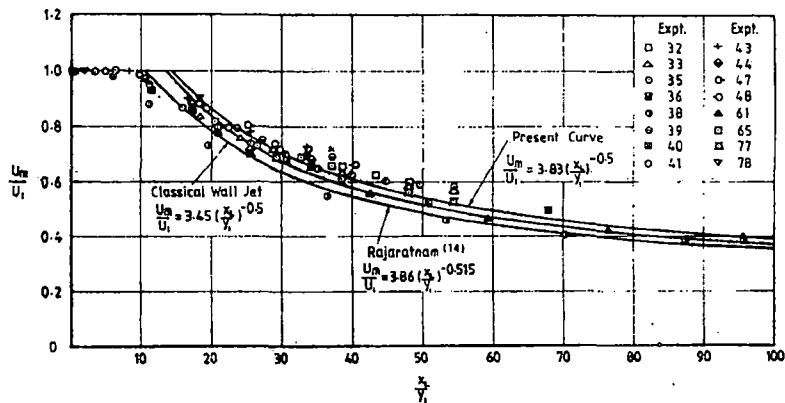


Figura 2.5.5 Disminución de la Velocidad Máxima en el Solado

Comparando sus resultados con los correspondientes al chorro de pared clásico encontraron que, para el rango de mediciones efectuadas, el flujo sobre el solado es esencialmente un chorro de pared ligeramente modificado por el flujo regresivo.

En la figura 2.5.6 se muestra perfiles de velocidad típicos medidos en un perfil de erosión rígido. Según puede observarse las mediciones son más completas sobre la línea de máxima velocidad que cerca al lecho.

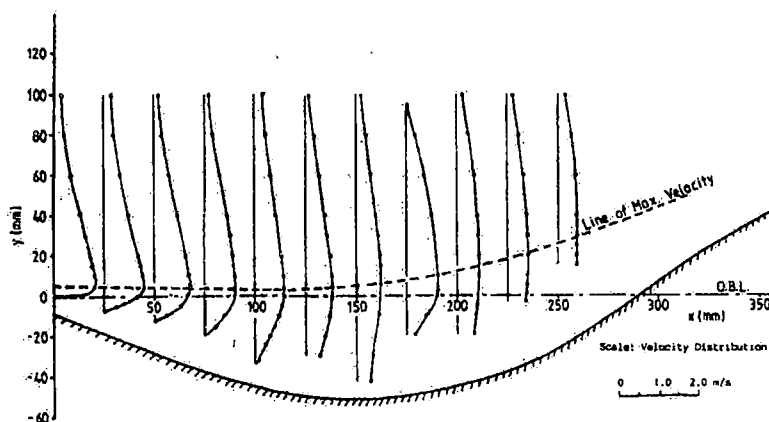


Figura 2.5.6 Distribución de Velocidades Típica en la Zona Erosionada

El interés de los autores fue establecer una relación entre la velocidad máxima a lo largo del perfil de erosión y la velocidad máxima en el extremo final del solado (donde se inicia el lecho móvil) —esta última velocidad máxima podía ser estimada utilizando la expresión empírica deducida por ellos para la variación de la velocidad a lo largo del solado. Las expresiones que dedujeron pueden ser revisadas en la referencia 6.

Era posible entonces estimar la velocidad máxima para determinada profundidad de erosión máxima y viceversa, relación necesaria para resolver la ecuación diferencial establecida por ellos en su teoría semi – empírica. Hallaron que la mejor forma de la curva s versus t se obtenía para $r = 2$ en todas las pruebas. β_1 fue determinado de modo que la relación s versus t obtenida de la integración se aproxime a los resultados experimentales; se halló que β_1 dependía de la posición de la línea de velocidad máxima en el perfil de erosión. En la figura 2.5.7 se compara la relación s versus t experimental con la obtenida mediante el uso de la teoría semi – empírica.

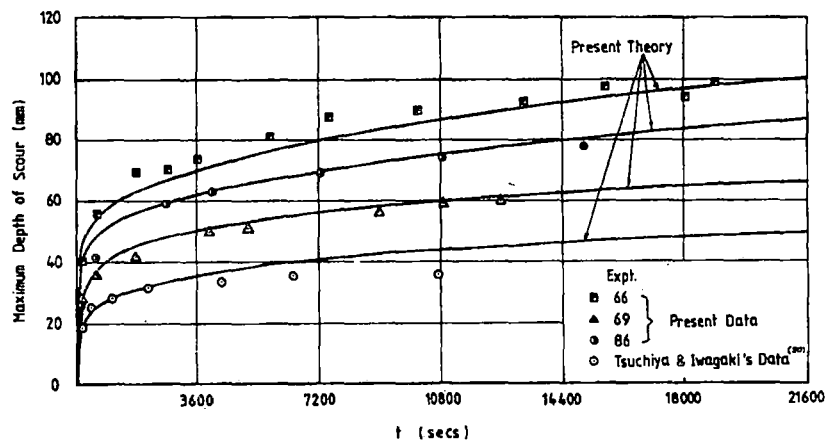


Figura 2.5.7 Variación de la Profundidad de Erosión Máxima en el Tiempo

Una observación importante es que la ecuación diferencial deducida en su teoría semi – empírica conduce a establecer que el parámetro de similitud mecánica para el modelamiento de la erosión local es el número de Froude.

2.6 ESTUDIO DE S. CHATTERJEE, S. GHOSH Y M. CHATTERJEE (1994)

Este estudio es una continuación del efectuado por S. Chatterjee y S. Ghosh en 1980. En base a las mismas pruebas efectuadas anteriormente desarrollaron expresiones empíricas adicionales, las cuales en algunos casos son elaboradas sin establecer un sustento físico en concordancia. Se presenta sólo algunos de sus resultados.

Relacionan el tiempo necesario para llegar a la profundidad de erosión de equilibrio con la velocidad de salida del chorro, obteniendo el gráfico que se muestra en la figura 2.6.1. Se observa la influencia de las características del sedimento.

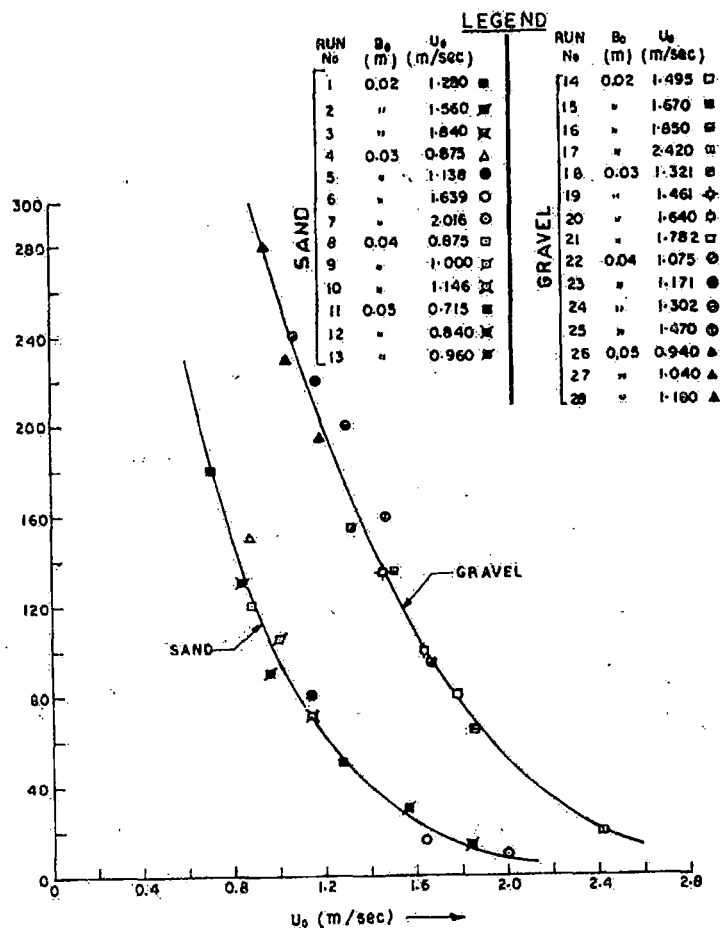


Figura 2.6.1 Tiempo de Equilibrio y Velocidad de Salida del Chorro

Para analizar la variación de la profundidad de erosión en el tiempo presentaron sus resultados tratando de utilizar la forma del parámetro adimensional dado por Hunter Rouse en su estudio de la erosión producida por un chorro vertical sumergido. En ese entonces se consideró como característica representativa del sedimento a la velocidad de caída, pero esto había dejado de considerarse en estudios posteriores. Incluso los autores hacen uso del diámetro medio en la mayoría de sus relaciones empíricas. *Esto no está muy bien definido en su estudio.* En la figura 2.6.2 se muestra el resultado obtenido observándose un parámetro adimensional de tiempo bastante complejo. Asimismo, se observa la influencia aún de las características del material.

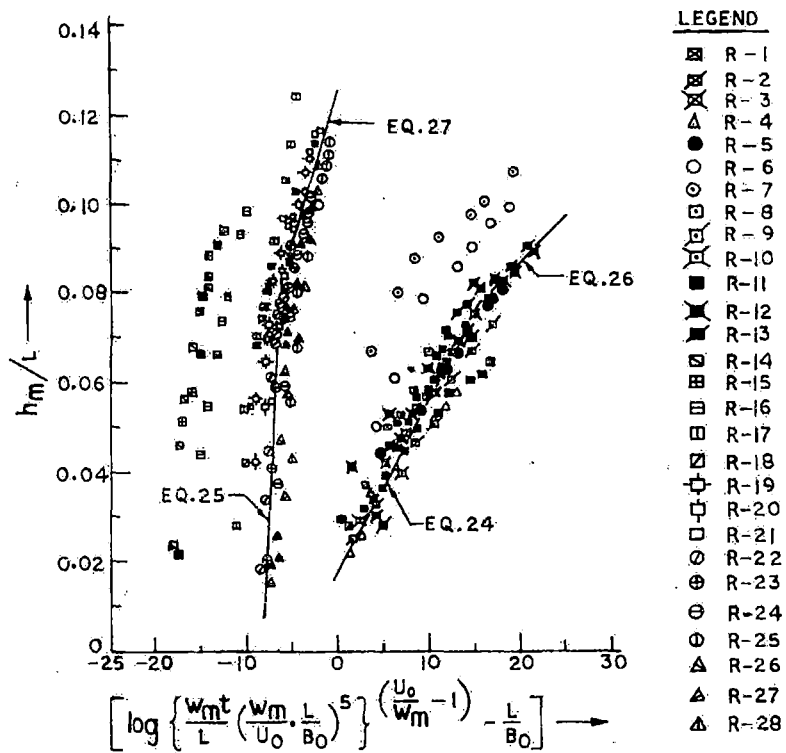


Figura 2.6.2 Desarrollo de la Profundidad de Erosión Máxima

En la figura 2.6.3 se muestra un gráfico que relaciona la profundidad de erosión máxima en la condición de equilibrio con el número de Froude. La abertura de compuerta ha sido utilizada como parámetro de escala de longitudes. El número de Froude también ha sido calculado en función de esta variable. Se observa que no existe dependencia con las características del sedimento.

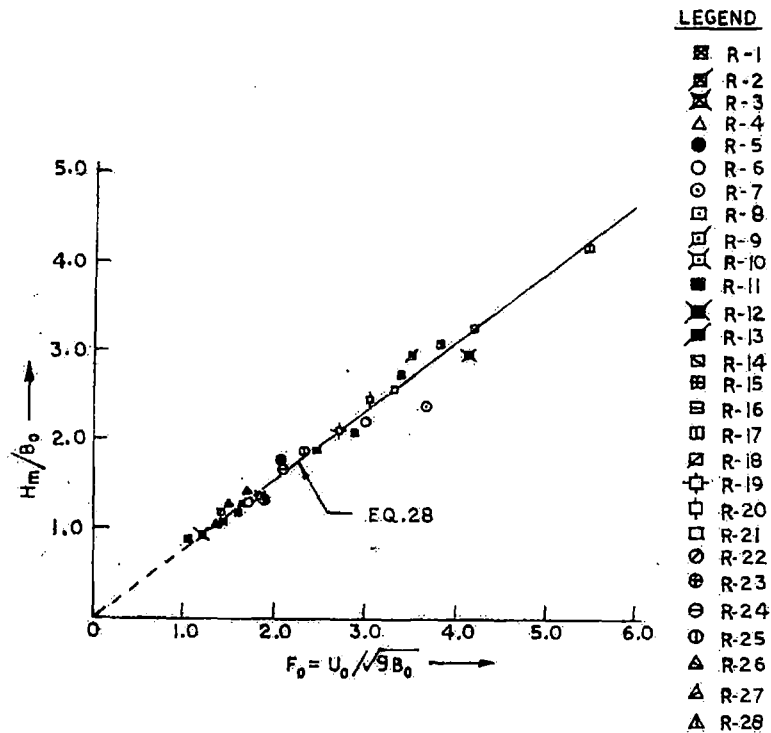


Figura 2.6.3 Profundidad de Erosión Máxima y Número de Froude

2.7 COMENTARIO

Los estudios presentados en este capítulo han sido seleccionados en vista de su relevancia para el estudio de la erosión localizada a la salida de una compuerta. La mayoría de ellos cuentan con un análisis teórico previo a la experimentación, lo cual es imperativo. Asimismo, la secuencia del modo en que se ha ido desarrollando el esquema que hasta ahora caracteriza al fenómeno de erosión localizada resulta interesante y didáctico. Se tiene conocimiento de estudios más recientes, los cuales han permitido dilucidar algunas de las fases de la presente investigación; tal es el caso del estudio desarrollado por Aderibigbe y Rajaratnam (1998) quienes analizaron el efecto de la gradación o no uniformidad del material de lecho móvil sobre la erosión producida por un chorro horizontal, efectuando pruebas con duración de días para llegar al estado de equilibrio. Este y otros estudios son mencionados en adelante pero no son presentados íntegramente puesto que su contribución es específica.

Capítulo 3

ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA

En ingeniería hidráulica se tiene casos de flujo en cauces en los cuales se ha interpuesto una estructura; esta, al obstaculizar o alterar de alguna manera el flujo, produce gradientes de velocidad que se traducen en gradientes en el transporte de sedimentos, todo lo cual puede resultar en una remoción local del material que compone el cauce o lecho móvil adyacente a la estructura. Las condiciones de flujo en esta zona erosionada son no permanentes: al ir ampliándose la sección de flujo se modifican el patrón de velocidades y la capacidad de transporte de sedimentos, *pudiendo* alcanzarse una condición límite o de equilibrio para la cual no se produce mayor profundización del contorno móvil. Se trata de un proceso muy complejo en el cual intervienen variables que caracterizan el flujo, la estructura u obstáculo, y el material de lecho, existiendo una interacción entre estas de difícil evaluación y cuantificación. Es por ello que los avances alcanzados hasta la fecha en el estudio del proceso de erosión localizada en sus diferentes formas se basa principalmente en estudios experimentales, con análisis teóricos importantes pero aún limitados.

La presente investigación considera el caso de la erosión localizada a la salida de una compuerta: un chorro de agua horizontal sale por una abertura de compuerta con determinada velocidad y fluye sumergido sobre un solado rígido de cierta longitud para pasar luego a un lecho inicialmente plano de material no cohesivo y erosionable. Si bien se trata de un caso particular, su estudio permite comprender y/o es-

tablecer algunos aspectos generales del proceso de erosión. Igualmente, el conocimiento de las características generales, el cual se ha ido incrementando a través de las numerosas investigaciones realizadas a lo largo de muchos años, nos sirve de guía para el correcto análisis teórico del caso estudiado, una productiva ejecución de las pruebas y una acertada interpretación de los resultados.

El proceso de erosión localizada a la salida de una compuerta ha sido estudiado anteriormente —según se ha indicado— de modo que se tiene conocimiento de varias de sus características físicas y se cuenta con algunas expresiones que lo describen. Con base en tales estudios y algunos otros que se consideran aplicables, y considerando las limitaciones de aplicar un modelo matemático, además de limitaciones de carácter experimental, se ha desarrollado un análisis teórico con detalle moderado de lo que ocurre al interior del fenómeno, según veremos.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA

En la figura 3.1.1 se muestra un esquema general del caso estudiado modificando ligeramente el esquema del estudio efectuado por Tsuchiya e Iwagaki [20]. En el corte longitudinal se presenta la compuerta plana deslizante, el solado rígido, el lecho móvil con formación de un perfil de erosión típico, un perfil de velocidades típico al extremo final del solado, y vórtices de eje horizontal en determinadas ubicaciones. El caso ha sido estudiado en un modelo bidimensional, es decir, el corte longitudinal es el mismo en todo lo ancho del modelo físico.

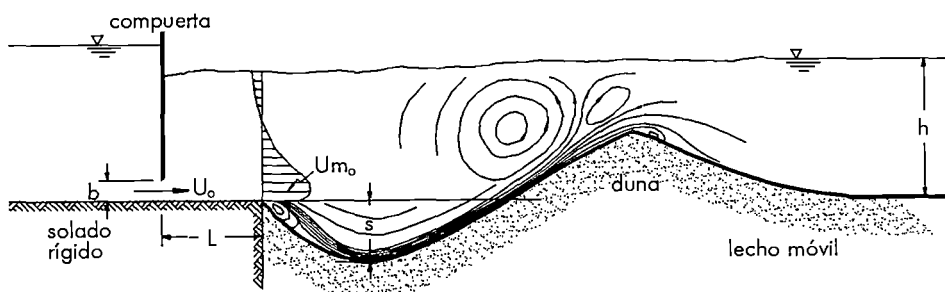


Figura 3.1.1 Esquema del Caso Estudiado
(Modelo Bidimensional)

Las variables que participan en el fenómeno son: la abertura de compuerta b , la velocidad a la salida del chorro U_o , la longitud del solado L , el tirante de sumergimiento h y las características de los sedimentos en el lecho móvil. Algunas otras variables que podrían considerarse importantes, como la carga de agua que produce el chorro (diferencia entre los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo de la compuerta) o la velocidad al extremo final del solado, se verá que pueden ser función de las variables antes establecidas, como lo es el caudal específico $q = U_o b$.

Debe señalarse que se trata de erosión en la que no hay ingreso de sedimentos desde aguas arriba, denominada en la bibliografía como erosión de agua clara (clear-water scour).

3.1.1 Difusión del Chorro de Agua en el Solado Rígido

El patrón de flujo sobre el solado rígido es el de un chorro horizontal de agua que fluye sumergido con una velocidad de salida determinada. Se ha comprobado que el comportamiento del chorro sumergido sobre el solado es similar al de un chorro de pared clásico^{*}, es decir, se produce una difusión del chorro en su recorrido que no es mayormente afectada por el lecho móvil aguas abajo [6]. La difusión del chorro ocurre porque el chorro ingresa a un medio con menor velocidad de modo que es desacelerado continuamente mientras el flujo alrededor es acelerado; es decir, se produce un intercambio de fluido entre las dos zonas adyacentes con intercambio de sus características locales. Esto da lugar a una expansión gradual del chorro y de los perfiles de velocidad en su recorrido hasta el final del solado.

Los chorros planos o bidimensionales *libres* —no de pared— completamente sumergidos (ver esquema en la figura 3.1.2), muestran una zona de establecimiento del flujo con un núcleo de longitud L_k dentro del cual la velocidad se mantiene igual a la velocidad de salida del chorro U_o ; es decir, no hay atenuación de la velocidad en esta longitud. Esta longitud está dada por: $L_k = 6b$, donde b es la abertura de salida del chorro.

* En el chorro de pared clásico el contorno es fijo, no móvil.

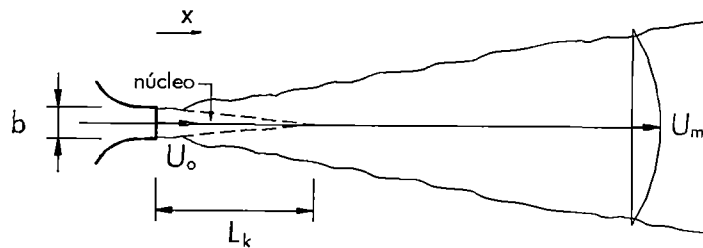


Figura 3.1.2 Esquema de Chorro Libre

Luego, para distancias x mayores a L_k , la velocidad máxima del chorro disminuye según:

$$\frac{U_m}{U_0} = \sqrt{\frac{\delta b}{x}}$$

Los chorros de pared clásicos tienen características en la zona externa similares a las del chorro libre; si bien a lo largo de la pared se desarrolla una capa límite, esta es relativamente delgada, casi despreciable, de modo que la expresión de difusión indicada para el chorro libre es válida para el chorro de pared clásico [2].

Esta característica permite representar el chorro al final del solado —o inicio del lecho móvil erosionado— pues puede determinarse la velocidad en esta ubicación, U_{m_0} , en función de U_0 y b/L :

$$U_{m_0} = \sqrt{\frac{\delta b}{L}} U_0$$

3.1.2 Desarrollo del Perfil de Erosión

Al inicio del proceso de erosión la capacidad de transporte es elevada, con un rápido crecimiento de las dimensiones del perfil de erosión; luego, su desarrollo se produce a menor velocidad y puede alcanzarse la condición de equilibrio en un tiempo relativamente prolongado. En la zona inmediata al solado rígido se produce una separa-

ción del flujo debido a la rápida disminución local de la velocidad, generándose vórtices pequeños de eje horizontal. Otra separación o discontinuidad se ha producido en la parte superior del chorro de pared desde su difusión sobre el solado rígido, con los consiguientes vórtices de eje horizontal —de mayor tamaño. En los casos de erosión localizada en los que puede despreciarse el efecto de la superficie de flujo sobre el proceso —como podría ser el caso debido al tirante de sumergimiento—, el desprendimiento y transporte de los sedimentos depende exclusivamente de las condiciones de flujo adyacentes al lecho. Es por ello importante la velocidad máxima y no la velocidad media en el perfil de flujo. Según ello, la capacidad de transporte en el interior de la zona erosionada será máxima en la sección de velocidad máxima y en tal ubicación el perfil de erosión será más profundo. A partir de esta ubicación la capacidad de transporte disminuye y parte del sedimento erosionado se deposita formando un talud en el perfil de erosión.

El transporte de sedimentos en la zona erosionada se distribuye del siguiente modo: una parte de los sedimentos puestos en movimiento es expulsada de la zona erosionada en forma tangencial al talud formado y se deposita casi inmediatamente formando un montículo de sedimentos: la duna*; otra parte no llega a salir de la zona erosionada y se desliza sobre el mismo talud para retornar a la zona de erosión máxima y ser puesto nuevamente en movimiento por el chorro; una pequeña parte circula sobre la zona erosionada —en suspensión— por acción del vórtice de regulares dimensiones que se forma en la parte superior; y por último, se tiene una circulación pequeña de sedimentos en el talud inmediato al solado de protección, la cual también entrega sedimentos al chorro para su transporte. La recirculación del material erosionado y la barrera que representa la duna tienen un efecto reductor sobre la erosión; de este modo, el transporte fuera de la zona erosionada disminuye al incrementarse la profundidad de erosión pues el vórtice de circulación se agranda y la barrera de la duna se hace mayor, reduciéndose la fuerza del fluido.

Suele considerarse el esfuerzo cortante como la fuerza del fluido que pone en movimiento a los sedimentos. Dado que la fuerza del fluido y la estabilidad de las partículas varía sobre la superficie del lecho, es razonable asumir que las partículas son des-

* Aunque se usa el mismo nombre, su formación es distinta a la de la duna como *fase del transporte sólido*.

prendidas no por acción de una fuerza de fluido constante sino por la acción de alteraciones aisladas: pequeños vórtices asociados a la turbulencia del flujo [7]. En mediciones efectuadas por M. Raudkivi en 1967 se halló que los esfuerzos cortantes en el lecho del perfil de erosión eran inferiores a los valores críticos de iniciación de movimiento según Shields; ello puso en evidencia que el proceso de erosión estaba influenciado por la turbulencia. De todos modos, se acepta el esfuerzo cortante como *índice* de la fuerza del fluido que produce el movimiento de los sedimentos.

Transcurrido un determinado tiempo puede llegarse a la condición límite o de equilibrio, instante en el cual el perfil de erosión no profundiza más; este límite puede definirse de dos maneras: la fuerza del fluido disminuye a un valor crítico para el cual el sedimento no puede ser transportado fuera de la zona erosionada o, la capacidad de transporte de sedimentos del chorro de pared es igualada por el transporte recurrente debido al vórtice. Entonces, en la condición de equilibrio sí puede haber movimiento de sedimentos pero sin significar esto mayor profundización del lecho. Según el estudio efectuado por Chatterjee y Ghosh (1994), el tiempo necesario para llegar al equilibrio varía en relación inversa a la velocidad del chorro; ellos hallaron esta condición en tiempos que variaron en el rango de 10 a 280 minutos, con velocidades del chorro de 0,84 m/s a 2,42 m/s. Según sus escritos, *“el estado de equilibrio se alcanzó cuando no se observó movimiento de partículas en la ubicación de erosión máxima”* [5]. Aderibigbe y Rajaratnam (1998) estudiaron un chorro bidimensional horizontal pero sin solado rígido y alcanzaron lo que llamaron *estado asintótico* en periodos de tiempo mucho mayores, de 5 a 52 horas, para velocidades de 0,58 m/s a 4,77 m/s. Ellos definieron este estado como aquel en el cual *el transporte de sedimentos sobre la duna era insignificante* [1]. La diferencia entre ambos estudios en cuanto al tiempo para llegar a ese estado límite se debe no sólo a la definición de cuál es el estado límite sino, principalmente, a que Aderibigbe y Rajaratnam se permitieron un mayor tiempo de experimentación y lograron observar una oscilación en el proceso de erosión: el perfil de erosión se formaba de la manera usual pero en determinado instante (luego de varias horas), parte del material acumulado en el talud aguas arriba de la duna se desplomaba; entonces se producía una erosión intensa y desordenada que finalmente conseguía que el chorro impacte sobre la duna de manera horizontal para nuevamente formarse el perfil de erosión de la manera usual. Estos dos patrones de erosión se sucedían alternadamente. Esta observación pone en evidencia que no

siempre se alcanzará una condición de equilibrio de manera gradual y ordenada, menos aún en condiciones más irregulares como las que se presentan en la naturaleza; incluso es factible que nunca se alcance la condición límite, de equilibrio o asintótica. Es importante saber, sin embargo, que para una fracción del tiempo necesario para llegar a este estado límite se produce gran parte de la profundización máxima del perfil de erosión: según un estudio elaborado por Kurniawan, Altinakar y Graf (2001), quienes estudiaron la erosión producida por un chorro de agua horizontal bidimensional, sin longitud de solado rígido previa al lecho móvil y en pruebas que duraron hasta 91,8 horas, el 80% de la profundidad máxima de erosión se produjo en el 13% del tiempo necesario para llegar al estado asintótico [9]. Si bien estos valores no se pueden tomar como exactos o generales, son índice del rápido desarrollo inicial del perfil de erosión y quizás, de la poca importancia de conocer el valor exacto del tiempo necesario para llegar a un límite, el cual podría prolongarse mucho con poca variación adicional en la profundidad máxima de erosión.

Finalmente, una característica importante observada en investigaciones efectuadas con chorros horizontales sumergidos, es que el perfil de erosión presenta similitud de forma. Esta similitud de forma es obviamente aproximada habiéndose observado ciertas variaciones al comparar los perfiles de erosión obtenidos con diferentes longitudes de solado y distintas características del material de lecho. Debe aclararse, sin embargo, que las características del material de lecho influyen sólo ligeramente si todas las partículas son transportadas por el chorro, pero en los casos de acorazamiento, donde las partículas más gruesas no son transportadas, sí se hace más evidente la influencia de las características del lecho sobre la forma de los perfiles de erosión. De otro lado, se considera que la velocidad de salida del chorro y el tiempo también afectarían la forma del perfil desde que se producen fases en el transporte de los sedimentos sobre la duna, según se ha indicado. Aún así, estos efectos no serían muy pronunciados de modo que sí puede aceptarse la similitud de forma, permitiendo esto simplificar enormemente el fenómeno pues el perfil de erosión quedaría determinado por una única característica geométrica, por ejemplo, la profundidad de erosión máxima. La similitud de forma ha sido útil para los estudios efectuados hasta la fecha, tanto al efectuar las pruebas experimentales como al desarrollar los análisis teóricos y cálculos correspondientes.

3.1.3 Variables Descriptivas del Material de Lecho

Las características del material de lecho no cohesivo que se considera intervienen en el fenómeno de erosión localizada son: la distribución granulométrica del material, la forma y densidad de las partículas individuales, y el estado global del lecho [18]. Con excepción de algunos casos especiales, la forma y la densidad de las partículas de sedimento naturales no suelen ser muy variables; es usual considerar un factor de forma para la arena de 0,7 y un peso específico relativo de 2,65 [15]. De otro lado, puede aceptarse que el estado global del lecho (plano) queda definido por las propiedades de los sedimentos. Entonces, la característica más importante del material de lecho será su distribución granulométrica, la cual debe ser adecuadamente representada mediante pocos parámetros. Un parámetro obviamente importante es el diámetro de sedimento que, entre los que componen la mezcla de sedimentos, la representa. Otro parámetro sería el que indica el grado de uniformidad de las partículas. Para determinar estos parámetros debe efectuarse un análisis granulométrico de una muestra del material, el que suele ser presentado en diagramas logarítmicos o log-probabilísticos —estos últimos con escala de probabilidad normal— en los que se indica el porcentaje acumulado en peso de partículas con diámetro inferior a un diámetro dado. Entonces puede obtenerse el diámetro de partícula para el cual el 95% en peso de la muestra es más fino, d_{95} ; aquel para el cual el 50% en peso de la muestra es más fino, d_{50} , etc. En el diagrama log-probabilístico, d_{50} es el diámetro medio geométrico d_g . El grado de uniformidad de la mezcla de sedimentos suele estar dado por una relación entre dos diámetros característicos de la curva granulométrica; una relación muy utilizada en las investigaciones efectuadas a la fecha es la desviación estándar geométrica dada por:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}}} = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15,9}}$$

Algunos consideran que la mezcla es no uniforme si σ_g es mayor a 1,35, mientras que otros establecen que σ_g debe ser superior a 2,00 [1]. En mezclas uniformes es común utilizar como diámetro representativo d_{50} ó d_g ; en mezclas no uniformes más bien tiende a utilizarse d_{90} , d_{95} , u otros. Nuevamente citaremos el estudio efectuado

por Aderibigbe y Rajaratnam (1998) pues ellos determinaron el diámetro de una mezcla de sedimentos uniforme que tendría la misma erosión terminal que la mezcla de sedimentos no uniforme que se desea representar. A partir del análisis y procesamiento de sus resultados experimentales hallaron que el diámetro representativo de la mezcla de sedimentos no uniforme sería d_{95} [1]. Esto verifica que en materiales de lecho no uniformes la profundidad de erosión puede ser menor que en lechos uniformes pues se produce un transporte selectivo de los sedimentos: el material más fino es transportado sobre la duna mientras que el más grueso se desliza sobre el talud aguas arriba de la duna hacia la zona erosionada, modificándose las propiedades de la mezcla de sedimentos (se va haciendo más gruesa); de hecho, un efecto conocido durante el proceso de erosión de lechos no uniformes es la formación de una capa de acorazamiento en la superficie del lecho, que lo protege. Sin embargo, de incrementarse la fuerza del flujo, puede superarse la resistencia de las partículas de acorazamiento y entonces se transporta todo el material, en tal caso no podría afirmarse que la profundidad de erosión sería menor. Algo que debe mencionarse es que la mayor parte de los sedimentos aluviales son no uniformes mientras que en la mayoría de estudios efectuados se ha utilizado sedimentos uniformes; si bien es claro que para analizar un fenómeno debe procederse por partes, el estudio del efecto que tiene la gradación o no uniformidad de los sedimentos es imperativo.

En las investigaciones de Rouse (1939) y Laursen (1952), según se ha visto, se consideró la velocidad de caída de las partículas de sedimento como variable básica. Efectuando una caracterización similar a la mostrada para la distribución de los diámetros de partícula, obtuvieron la media y la desviación estándar geométricas de las velocidades de caída de las partículas de sedimento presentes. El uso de tales parámetros como representativos del material de lecho se debió a que consideraron que el movimiento relativo entre las partículas de sedimento y el fluido alrededor, bajo condiciones de arrastre, transporte y deposición, dependía esencialmente de los mismos factores que la velocidad a la cual las partículas caerían por el fluido bajo su propio peso [17]. Esto fue discutido por algunos y, valiéndose del concepto que relaciona la fuerza de flujo con la resistencia de la partícula al movimiento, se dejó de usar las características de velocidad de caída como parámetros representativos del material de lecho para el análisis de la erosión localizada. Esto lo demuestran las investigaciones posteriores a las de Rouse y Laursen.

3.2 EXPOSICIÓN DE LA HIPÓTESIS

La caracterización efectuada es la base para la formulación de las hipótesis que serán verificadas experimentalmente. Algunas características no han sido tratadas a pesar de contarse con cierta información porque no intervienen en el análisis teórico que se propone. Por ejemplo, la distribución de velocidades máximas a lo largo del perfil de erosión presentadas por Hassan y Narayanan (1994) mostradas en el capítulo 2, no forman parte del tratamiento del tema porque las expresiones empíricas deducidas solamente por ellos no pueden ser aún generalizadas; de otro lado, en el presente estudio experimental no se ha considerado efectuar tal tipo de mediciones al interior de la zona erosionada. Esta es una de las razones por las que el presente análisis teórico sería de tipo *caja gris* pues se tiene en cuenta lo que sucede al interior de la zona erosionada sólo cualitativamente, utilizándose para el modelamiento del fenómeno las variables de entrada (ingreso) y los resultados obtenidos (salida).

3.2.1 Parámetros Adimensionales que Intervienen en el Fenómeno

Las variables que participan en el proceso de erosión localizada a la salida de una compuerta estudiado son: la abertura de compuerta b , la velocidad a la salida del chorro U_o , la longitud del solado L , el tirante de sumergimiento h , el diámetro medio de las partículas de sedimento que conforman el lecho móvil d_{50} , la desviación estándar geométrica de estas partículas σ_g , la densidad del agua ρ , la densidad de los sedimentos ρ_s , la aceleración de la gravedad g , el tiempo t , y como variable dependiente: la profundidad de erosión s .

Se mencionó anteriormente que podría considerarse que la carga de agua que produce el flujo (diferencia entre el nivel de agua aguas arriba de la compuerta y el nivel de sumergimiento aguas abajo) es una variable adicional que debe ser incluida. El análisis y las pruebas mostrarán que esta carga de agua es una variable dependiente, al igual que el caudal específico q : ambas variables dependen de la velocidad de salida del chorro (capítulo 5). Entonces, no es necesario considerar estas variables en el análisis; será suficiente considerar solamente la velocidad de salida del chorro.

Como se tiene once variables en total y tres dimensiones fundamentales involucradas, entonces pueden formarse ocho parámetros adimensionales; estos son: $\pi_1 = s/b$, $\pi_2 = L/b$, $\pi_3 = d_{50}/b$, $\pi_4 = \sigma_g$, $\pi_5 = h/b$, $\pi_6 = \rho_s/\rho$, $\pi_7 = U_o^2/bg$, y $\pi_8 = U_o t/b$.

El número de parámetros adimensionales formados puede ser reducido. En primer lugar, se ha establecido que en el caso de sedimentos no uniformes puede utilizarse d_{95} en lugar de d_{50} , integrando de ese modo el parámetro π_4 . De otro lado, podemos considerar el parámetro adimensional introducido por Carstens (1966): el número de sedimento, $N_s = v/\sqrt{\Delta g d}$; donde v es la velocidad del fluido adyacente al lecho, d es el diámetro de la partícula, g es la aceleración de la gravedad y Δ es el peso específico relativo del material sólido sumergido, $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$. Como el número de sedimento de Carstens es muy similar a otro parámetro que viene siendo utilizado en estudios de erosión: el número de Froude densimétrico dado por $F_o = U_o/\sqrt{\Delta g d_{50}}$, podemos hacer uso de este último parámetro, con dos modificaciones: utilizar el diámetro d_{95} en lugar de d_{50} , y utilizar la velocidad al extremo final del solado —inicio del lecho móvil— en lugar de la velocidad a la salida del chorro. Como puede observarse, el número de Froude densimétrico en su forma original relaciona los parámetros adimensionales π_3 , π_6 y π_7 y es un parámetro con sustento pues resulta de la relación entre la fuerza del fluido y la resistencia que opone la partícula a su movimiento mediante su peso efectivo, según se explica en el capítulo 2. Asimismo, según las características de difusión del chorro, el parámetro π_2 se integra con la velocidad a la salida del chorro para obtener la velocidad al ingreso al lecho móvil. Se obtiene entonces, la siguiente relación entre parámetros adimensionales:

$$\frac{s}{b} = f\left(\frac{U_{m_o} t}{b}, \frac{U_{m_o}}{\sqrt{\Delta g d_{95}}}, \frac{d_{95}}{b}, \frac{h}{b}\right)$$

Incluso, en caso que el sumergimiento fuese alto, de modo que el crecimiento de la duna no tenga efecto sobre la difusión del chorro de pared en el solado rígido, el parámetro h/b no intervendría.

3.2.2 Adaptación del Análisis Efectuado por Carstens

Carstens estableció la siguiente hipótesis:

$$\frac{q_s}{vd} = f\left(\left(N_s^2 - N_{sc}^2\right) \frac{s}{b}, \text{geometría obstrucción, geometría partícula de sedimento}\right)$$

q_s es la capacidad de transporte por unidad de ancho o capacidad de transporte específica, N_{sc} es el valor mínimo del número de sedimento para el cual se producirá erosión, y b es una dimensión elegida de la obstrucción. Ya se indicó que el número de Froude densimétrico es otra forma del número de sedimento de Carstens de modo que puede ser reemplazado considerando que la velocidad de referencia v , es la velocidad máxima del chorro de pared al inicio del perfil de erosión U_{m_0} . Según las características de difusión del chorro, esta velocidad máxima sería función de U_0 y b/L .

La capacidad de transporte específica es igual a la velocidad de cambio del área del perfil de erosión, es decir:

$$q_s = \frac{dA}{dt} = K \left(s \frac{ds}{dt} \right)$$

La constante K se obtiene a partir de los perfiles de erosión pues $A = K_s s^2$ y K_s es una constante en vista de la similitud de forma de los perfiles de erosión. Si se obtienen experimentalmente valores de s versus t , puede entonces calcularse los valores de la capacidad de transporte específica q_s correspondientes, con un cierto margen de error.

La geometría de la obstrucción es en este caso la misma para todas las pruebas, pues se ha supuesto que la longitud de solado sólo tendrá efecto sobre la erosión en la medida que afecte la difusión de la velocidad hasta su ingreso al lecho móvil; asimismo, no se considera el efecto de la geometría de las partículas de sedimento.

Entonces, según el procedimiento de Carstens, utilizando las modificaciones en las variables ya indicadas, puede buscarse una relación empírica de la forma:

$$\frac{q_s}{(F_{95}^2 - F_{95c}^2)^{5/2} U_{m_0} d_{95}} = f\left(\frac{s}{b}\right)$$

Donde

$$F_{95} = \frac{U_{m_0}}{\sqrt{\Delta g d_{95}}}$$

F_{95c} es el valor crítico del parámetro para la condición de iniciación del movimiento.

Hallada esta relación, puede efectuarse su integración para obtener una relación de la siguiente forma:

$$\frac{s}{b} = f\left(\left(F_{95}^2 - F_{95c}^2\right)^{5/2} \left(\frac{d_{95}}{b}\right) \left(\frac{U_{m_0} t}{b}\right)\right)$$

Puede observarse que esta expresión combina los parámetros adimensionales que se supuso determinan el fenómeno analizado, con excepción del parámetro correspondiente al tirante de sumergimiento. Supondremos que el tirante de sumergimiento es suficientemente alto como para que su efecto sea apreciable. Las pruebas experimentales determinarán la validez de todas las suposiciones.

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El fenómeno que se desea investigar debe ser reproducido en un modelo físico sobre el cual se puedan efectuar pruebas experimentales que permitan verificar o refutar las hipótesis formuladas en el análisis teórico. Este modelo físico tiene un diseño, el cual, a parte de basarse en ciertas pautas dadas por la experiencia, no debe dejar de lado las posibilidades de innovación, enmarcándose siempre dentro de los principios básicos inherentes a la experimentación en el campo estudiado. En investigación hidráulica, donde suele trabajarse con modelos físicos a escala reducida*, se busca producir el mismo fenómeno del prototipo pero en pequeño; en ello debe tenerse en cuenta cuál es el grado de esquematización considerado al formular las hipótesis, cuáles son los criterios de similitud que gobiernan el proceso —si se conociesen—, qué variables se desea controlar, observar y medir, y cuál es la capacidad —de espacio y de instrumentos de medición— del laboratorio hidráulico. Asimismo, como en toda obra, debe tenerse en consideración su facilidad constructiva, su funcionalidad y su costo. El diseño del modelo físico a escala reducida no está dirigido únicamente a su construcción, sino también a su operación: las pruebas deben ser efectuadas según la esquematización y límites de modelamiento considerados, la manipulación de las variables debe ser sencilla y no debe alterar o distorsionar el fenómeno en modelo, las mediciones deben poder efectuarse con precisión y sin dificultad, debe contemplarse la posibilidad de hacer cambios en el modelo con facilidad y rapidez, etc.

* El término escala reducida es empleado en investigación básica aún si el modelo no corresponde a una escala de reducción determinada como sucede en investigación aplicada. Se refiere a un modelo pequeño que utiliza el mismo medio físico que el prototipo: es hidráulico y no análogo.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO UTILIZADO

Para el estudio experimental del fenómeno de erosión localizada a la salida de una compuerta se construyó el modelo hidráulico bidimensional cuyo esquema en planta y corte longitudinal se muestra en la figura 4.1.1. Se trata de un canal de sección rectangular de 0,60 m de ancho con paredes transparentes en la mayor parte de su longitud para visualización del flujo. Un tramo del canal tiene fondo rígido enlucido con mortero de cemento, el cual representa el solado de protección horizontal cuya longitud se desea variar durante las pruebas; el resto del canal es de fondo móvil: arena con granulometría preparada colocada en una profundidad de 0,35 m que permitirá el desarrollo de una erosión cuyo perfil será medido. En el tramo de fondo rígido opera una compuerta plana deslizante cuya posición puede ser variada a fin de conseguir longitudes de solado de 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, y 120 cm. Aguas abajo se tiene una compuerta tipo bisagra que permitirá regular el tirante de sumergimiento (tirante aguas abajo). El modelo tiene una longitud total de 9,15 m y una altura en toda su longitud de 1,20 m. Se ha hecho uso de vidrio y plexiglás en las paredes transparentes; tubos, platinas y planchas de fierro en las compuertas y marcos de refuerzo o apoyo; y muros de albañilería enlucidos con mortero de cemento en el resto de la estructura principal del modelo.

4.1.1 Tramo de Ingreso al Modelo

El tramo de ingreso al modelo consiste de una zona de dimensiones regulares donde el caudal de ingreso se amortigua y distribuye para luego ingresar al canal de observación simétrica y uniformemente. El caudal ingresa a este tramo lateralmente, mediante una tubería de abastecimiento de 14" de diámetro; es decir, se tiene un ingreso de flujo de sección circular, prácticamente unidimensional, que es desviado 90° para ingresar al canal de experimentación, donde se desea un flujo bidimensional, uniforme en su tramo inicial. Es por ello necesaria la zona de amortiguamiento y distribución, la cual tiene un ancho de 1,10 m y largo de 1,95 m, con un muro de división vertical a 0,95 m desde el inicio. Este muro de división está constituido de ladrillos tipo pandereta colocados sin unión con mortero de cemento ni enlucido.

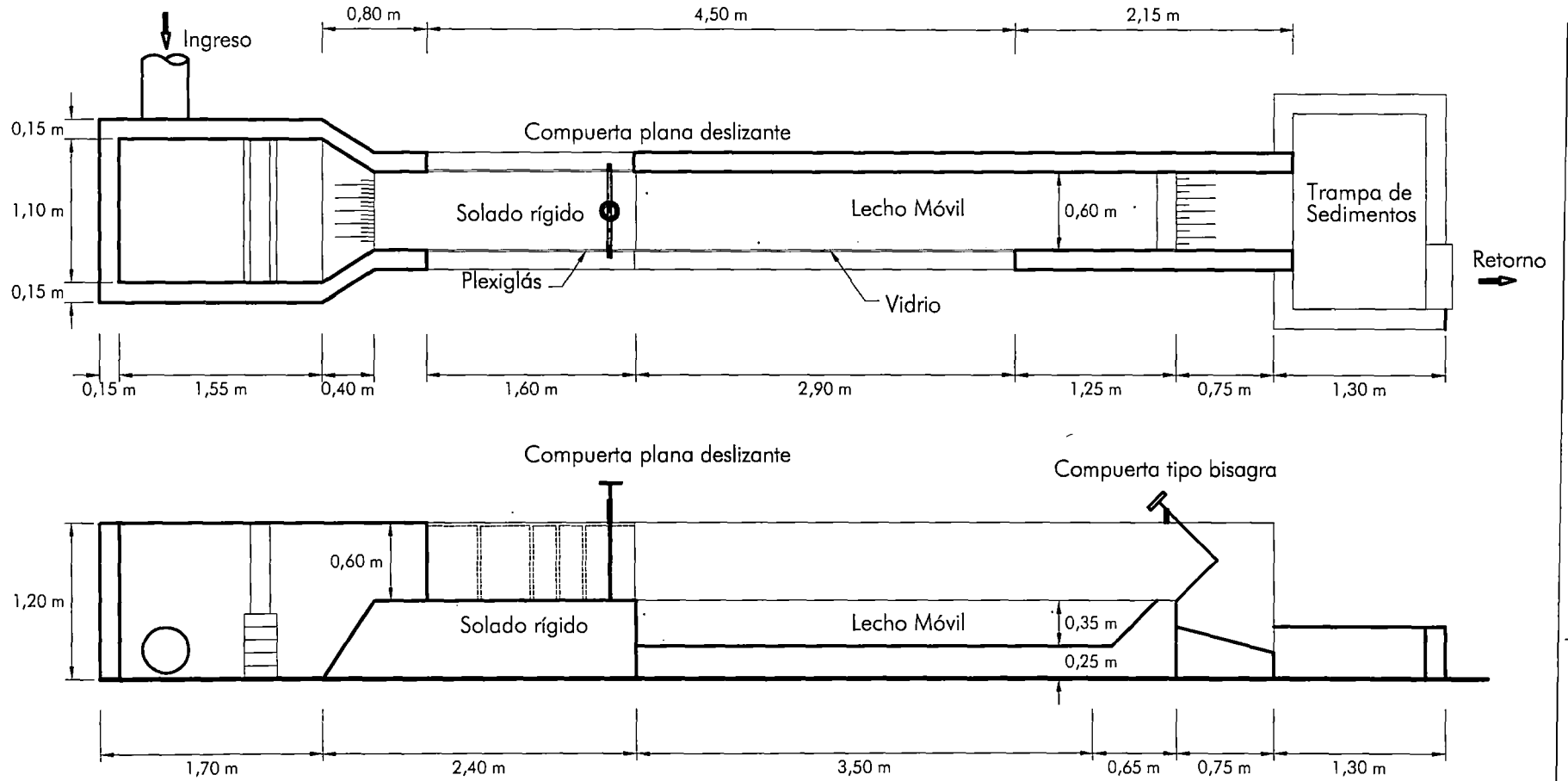


Figura 4.1.1
Esquema del Modelo Físico Utilizado

Escala 1:50

En la parte inferior, hasta una altura de 0,50 m, los ladrillos han sido colocados de cabeza, con los orificios en forma longitudinal, de modo que permiten el paso del flujo y lo distribuyen a lo ancho del canal, manteniendo una velocidad baja. El resto de la altura ha sido cubierta colocando los ladrillos en soga, impidiendo el paso del flujo por la parte superior, técnica usual al ingreso de los modelos y equipos de laboratorio, pues se concentra medianamente el flujo en la parte inferior evitando afectar el flujo en el canal de experimentación. Debe indicarse aquí que el nivel de agua que se alcanzará en esta zona de amortiguamiento es el mismo que se tendrá en el modelo aguas arriba de la compuerta plana deslizante, de modo que este amortiguamiento y distribución se produce en un volumen de agua relativamente grande lo cual favorece su efectividad. Finalmente, para el ingreso propiamente dicho al canal de experimentación se ha hecho uso de una rampa la cual permite un ascenso gradual del flujo hacia el nivel del fondo del canal. De esta manera se obtiene un flujo uniformemente distribuido a lo ancho, es decir, bidimensional, sin portar efectos de aguas arriba que alteren las condiciones de modelamiento requeridas.

4.1.2 Tramo de Fondo Rígido

El primer tramo del canal de experimentación es de fondo rígido —no erosionable— horizontal, con una longitud de 2,0 m. Se eligió un fondo rígido con terminación de mortero de cemento liso. Las paredes del canal en este tramo son de plexiglás por dos razones: para tener visibilidad del flujo y para poder practicarles unas ranuras que sirven de guía a la compuerta plana deslizante que opera en este tramo. Estas ranuras tienen un espesor de 2,0 mm y han sido efectuadas según las diferentes posiciones en las que se ubicará la compuerta plana deslizante. Las paredes de plexiglás tienen un espesor de 3/8" y llevan un marco de tubo de fierro cuadrado de 1" de peralte con travesaños verticales en la ubicación de cada ranura; cada travesaño tiene soldados en su interior dos tuercas a las cuales se ajustan los pernos de 3/8" que fijan el marco de la compuerta en la posición deseada (ver figura 4.1.2). Los paneles de plexiglás y sus respectivos marcos han sido empotrados a los muros de albañilería y mortero de cemento contiguos, soldándose un tirante de fierro en la parte superior para contrarrestar las fuerzas de presión a las que las paredes estarán sometidas. El marco de la compuerta también sirve a este propósito.

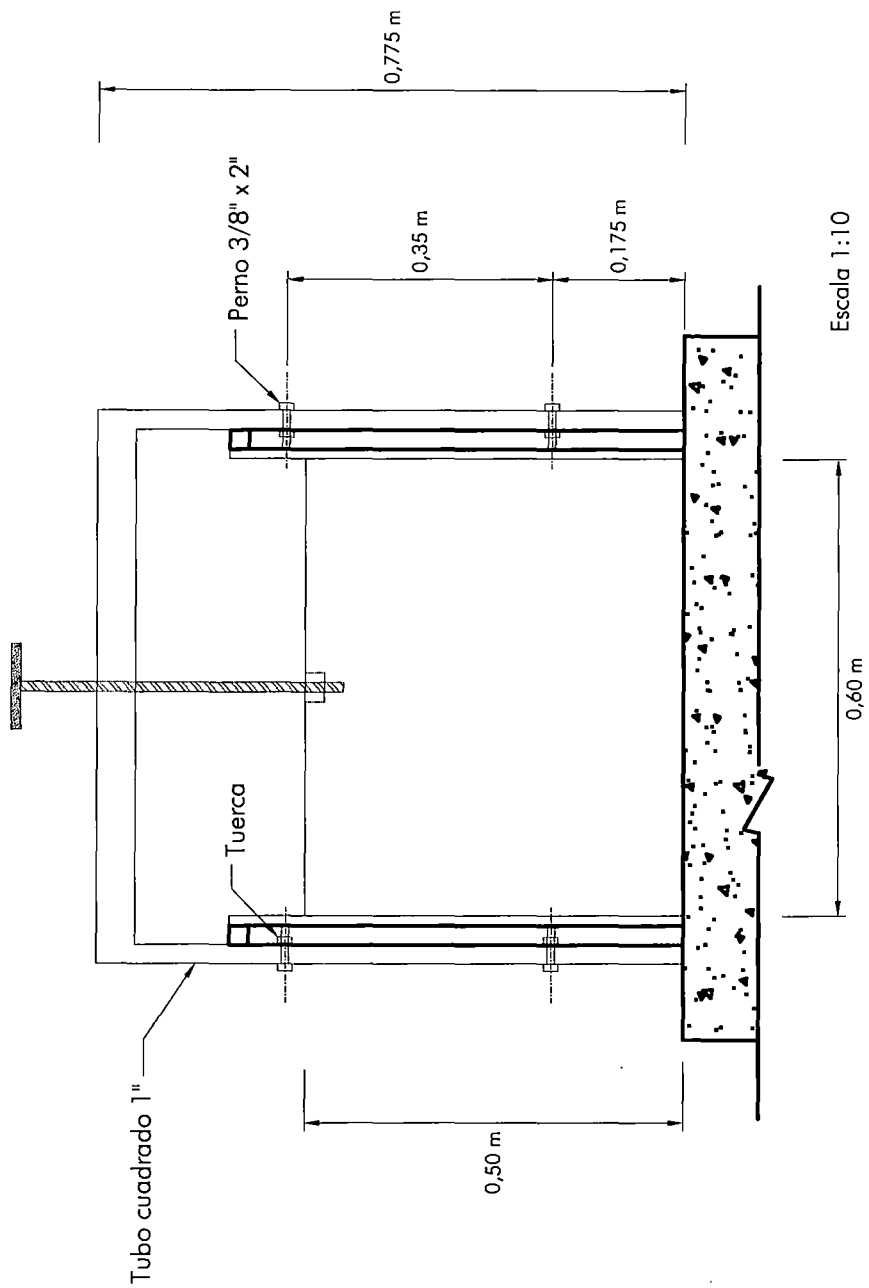


Figura 4.1.2
Esquema de la Compuerta Plana Deslizante

La compuerta plana deslizante es una plancha metálica de 1/20" de espesor reforzada en sus bordes con platinas de 3/8" de espesor; tiene una altura de 0,50 m y su marco permite aberturas de hasta 22,5 cm. Su borde inferior ha sido afilado a fin de que sea de tipo arista viva y en sus bordes laterales se colocó una cinta delgada de caucho para evitar filtraciones de agua por las ranuras. La apertura y cierre de la compuerta se efectúa haciendo uso de una varilla con ranuras helicoidales de posición fija respecto al marco de la compuerta y cuyo giro se acopla a una tuerca soldada a la compuerta, izándola. El fondo rígido enlucido con mortero de cemento hace las veces de un solado de protección horizontal. Cambiando de posición la compuerta se varía la longitud de este solado obteniéndose longitudes de 0,20 m; 0,40 m; 0,60 m; 0,80 m y 1,20 m. En la figura 4.1.3 se muestra una fotografía del tramo de fondo rígido sin operación del modelo.

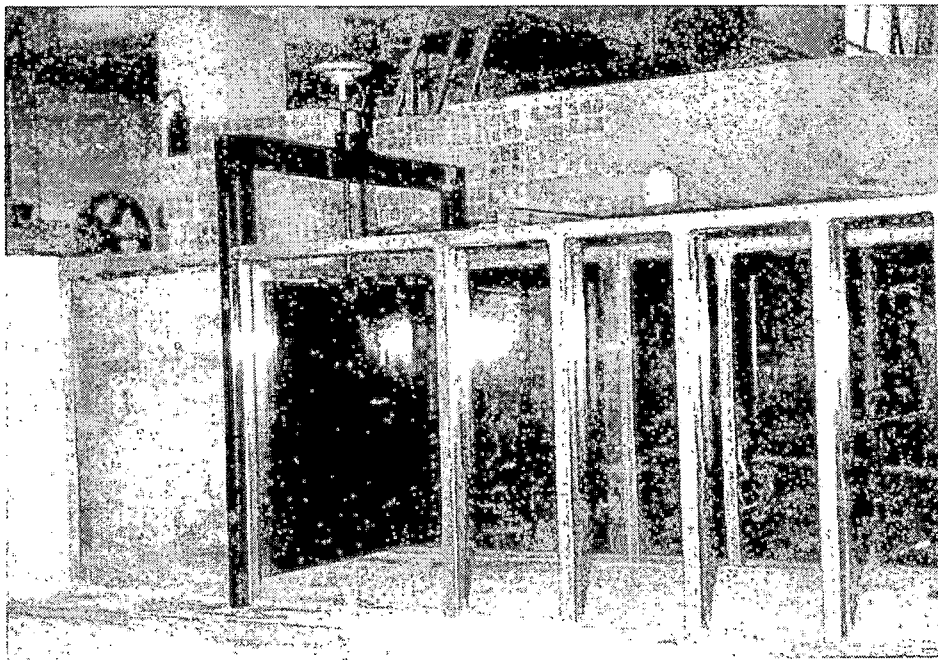


Figura 4.1.3 Tramo de Fondo Rígido

4.1.3 Tramo de Fondo Móvil

Inmediatamente después del tramo de fondo rígido se tiene el tramo de fondo móvil —erosionable. En este tramo se tiene una pared de vidrio de 10 mm de espesor en una longitud de 2,90 m y lleva un marco similar al de las paredes de plexiglás del

tramo de fondo rígido pero en este caso con los travesaños verticales más espaciados lográndose una mejor visualización del fenómeno de erosión. Dado que en este tramo la presión del agua es mayor (mayor altura de agua debido al agua intersticial en el material de lecho móvil), el marco metálico ha sido reforzado con travesaños adicionales, en forma de L, los cuales aportan rigidez a los travesaños originales y, asimismo, hacen las veces de tirantes en la parte superior del canal. El panel de vidrio y su refuerzo han sido empotrados a los muros de albañilería y mortero de cemento contiguos, al igual que en el caso de las paredes de plexiglás y, en la unión entre el plexiglás y el vidrio, sus respectivos marcos se ajustaron mediante pernos, cuidando de dejar una holgura entre plexiglás y vidrio que luego fue sellada con silicona. Los travesaños adicionales también fueron empotrados en uno de sus extremos (el del tramo vertical) mientras que el otro extremo (correspondiente al tirante horizontal) fue atornillado al muro de albañilería enlucido de la pared posterior. Para minimizar la diferencia de rugosidad entre las paredes laterales (una de vidrio y la otra enlucida con mortero de cemento) se adhirió un papel plastificado al muro enlucido. Finalmente, el espacio reservado para el lecho móvil fue llenado con material de granulometría preparada. En la figura 4.1.4 se muestra una fotografía que presenta el interior del canal visto desde la salida aguas abajo.

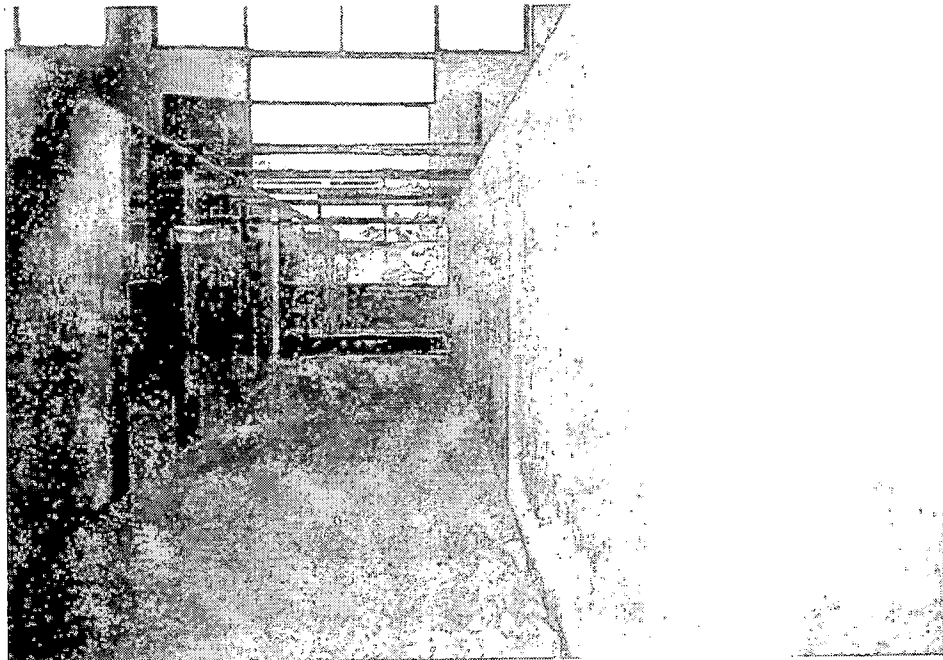


Figura 4.1.4 Vista del Interior del Modelo desde la Salida

4.1.4 Material de Lecho Móvil Utilizado

La presente investigación está referida a materiales de lecho no cohesivos de modo que se utilizó arena sin presencia de finos. Dado que una de las variables de interés es la gradación o no uniformidad del material de lecho, se prepararon dos mezclas de sedimentos, denominadas Suelo 1 y Suelo 2, ambas con el mismo diámetro medio geométrico, pero con diferente desviación estándar geométrica. Para preparar estas mezclas o suelos se procedió de manera inversa a la práctica usual; es decir, en lugar de tener el material y efectuar un análisis granulométrico por tamizado que proporcione el diámetro medio y la desviación estándar geométricos correspondientes, se graficó la distribución granulométrica deseada en un diagrama log-normal en base al diámetro medio y la desviación estándar geométricos deseados, y luego, a partir del gráfico se determinaron los porcentajes de material de cada diámetro —o de cada intervalo de diámetros— que debían componer la mezcla. Con estos porcentajes en peso podía tomarse la cantidad pertinente de cada intervalo de diámetros y preparar así cada uno de los suelos. Para ello era necesario contar con un banco de materiales clasificado por tamaños, según los mismos intervalos considerados en el análisis, de modo que se tamizó un banco de arena dado y se obtuvieron las cantidades necesarias de material para cada intervalo. En la figura 4.1.5 se muestra una fotografía con pequeñas muestras de cada uno de los intervalos considerados: los retenidos en las mallas N° 100, N° 50, N° 40, N° 25, N° 16, N° 10, N° 8, y N° 4.

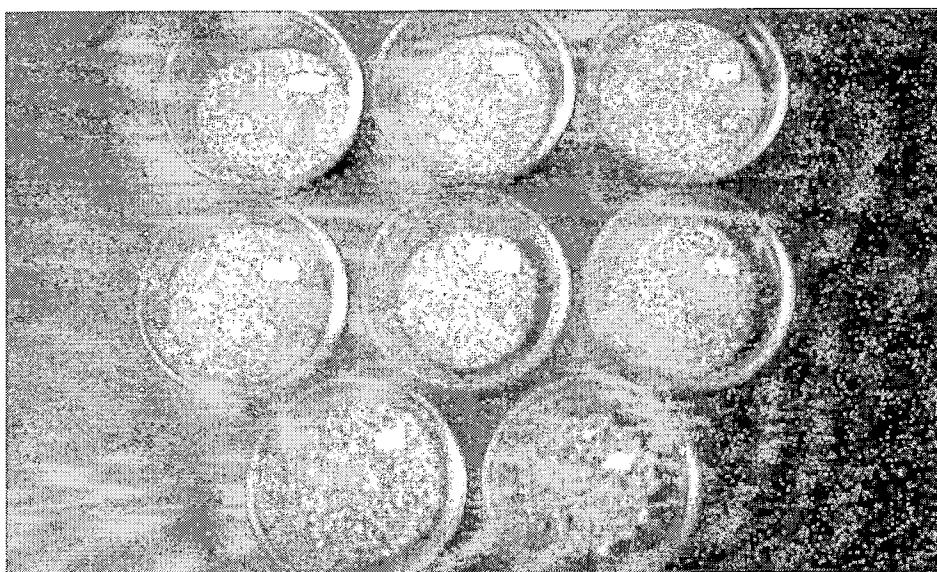


Figura 4.1.5 Pequeñas Muestras del Banco de Materiales Tamizado Preparado

En la figura 4.1.6 se muestra el gráfico de la distribución granulométrica deseada para los suelos 1 y 2; los porcentajes en peso acumulados son presentados en ordenadas con escala de probabilidad normal, mientras que los diámetros en mm son presentados en abscisas con escala logarítmica. Con estas escalas la distribución granulométrica de cada suelo debe ser una recta cuya posición está dada por el diámetro medio geométrico, en este caso, d_{50} , y cuya pendiente está dada por la desviación estándar geométrica σ_g . Según se ha indicado, a partir de estas distribuciones granulométricas se obtiene los porcentajes acumulados para cada tamiz o malla y entonces los porcentajes retenidos acumulados y los porcentajes retenidos parciales en cada intervalo de diámetros. Se obtiene así las relaciones mostradas en el cuadro 4.1.1 para el Suelo 1 y cuadro 4.1.2 para el Suelo 2.

Cuadro 4.1.1

Suelo 1 ($d_{50} = 1,19$ mm; $\sigma_g = 1,25$)

Malla N°	d (mm)	% Ac. Pasa	% Ac. Ret.	% Ret.
4	4.760	100.0	0.0	0.0
8	2.380	100.0	0.0	0.0
10	2.000	99.0	1.0	1.0
16	1.190	50.0	50.0	49.0
25	0.710	1.0	99.0	49.0
40	0.426	0.0	100.0	1.0
50	0.297	0.0	100.0	0.0
100	0.149	0.0	100.0	0.0

Cuadro 4.1.2

Suelo 2 ($d_{50} = 1,19$ mm; $\sigma_g = 2,00$)

Malla N°	d (mm)	% Ac. Pasa	% Ac. Ret.	% Ret.
4	4.760	97.7	2.3	2.3
8	2.380	84.1	15.9	13.6
10	2.000	77.3	22.7	6.8
16	1.190	50.0	50.0	27.3
25	0.710	22.8	77.2	27.2
40	0.426	6.9	93.1	15.9
50	0.297	2.3	97.7	4.6
100	0.149	0.0	100.0	2.3

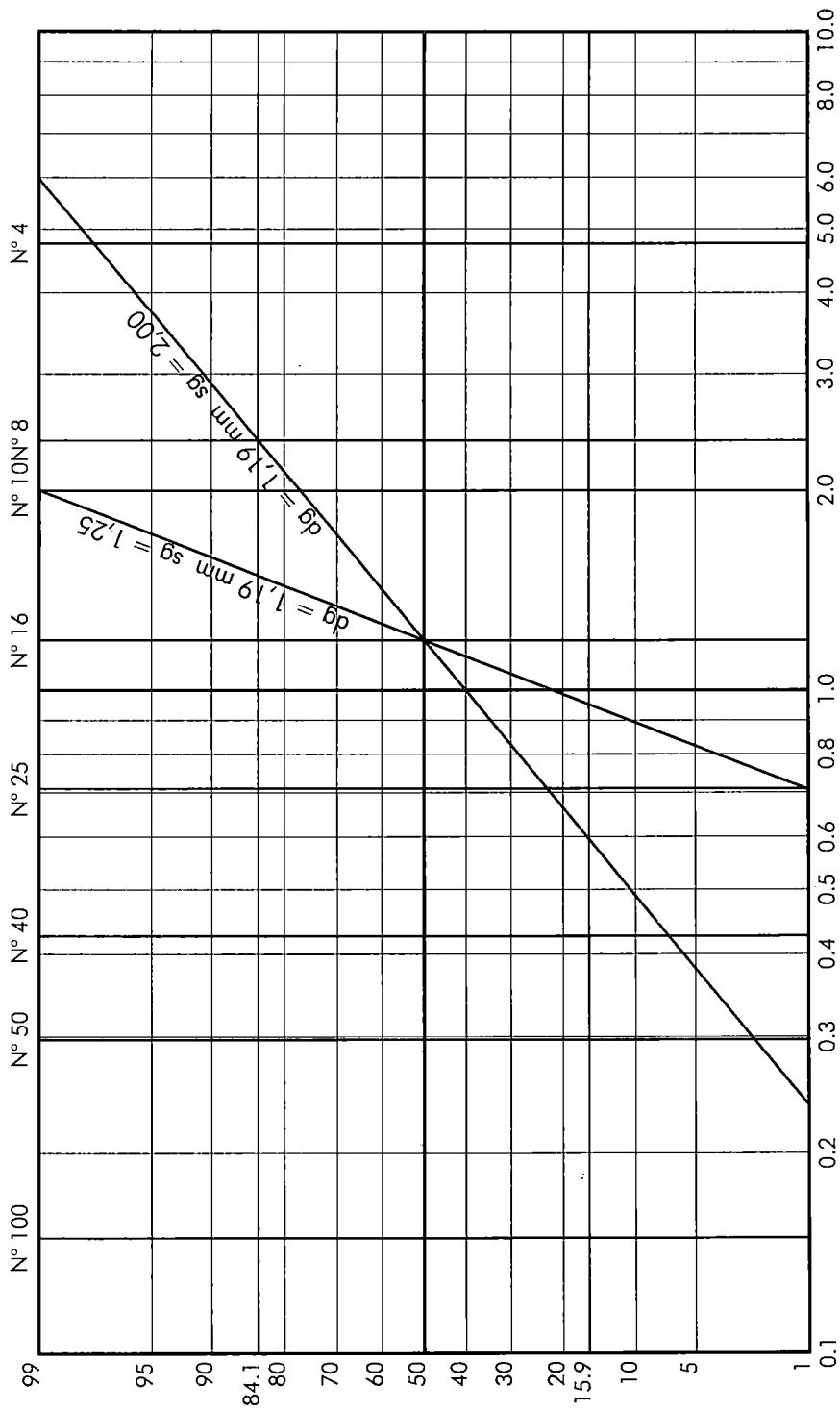


Figura 4.1.6
Distribución Granulométrica del Material de Lecho

Aproximadamente se preparó media tonelada de Suelo 1, el cual fue colocado en el canal sin compactación adicional. Posteriormente, a partir de este suelo, y siguiendo el mismo procedimiento, se determinó la cantidad adicional que de cada intervalo de diámetros debía agregarse para producir el Suelo 2. Este suelo también fue colocado en el canal sin compactación adicional. Se determinó la densidad de cada masa de suelo con humedad natural (del ambiente) y bajo las condiciones sin compactación con las que se trabajó en laboratorio. Para el Suelo 1 se halló $1,36 \text{ g/cm}^3$ y para el Suelo 2 se obtuvo $1,45 \text{ g/cm}^3$. La diferencia de densidades se asume se debe a que en el suelo no uniforme (Suelo 2) las partículas pequeñas ocupan mejor el espacio entre las partículas grandes, mientras que en un suelo uniforme (Suelo 1) quedan más espacios vacíos por ausencia de partículas finas. De hecho, un ensayo de cono de arena indicó para el Suelo 1 una porosidad de 0,50 y se estima que para el Suelo 2 sería algo menor. Estas características de densidad y porosidad de la masa de suelo se asume son dependientes del diámetro medio y la desviación estándar geométricos, según ha sido indicado anteriormente, de modo que no son variables a considerar en los cálculos pero que han sido estimadas como referencia.

4.1.5 Tramo de Salida del Modelo

El modelo requiere un control a la salida pues debe controlarse el tirante de sumergimiento aguas abajo. Para ello se ha instalado una compuerta tipo bisagra a la salida sobre la cual verterá el caudal que circule por el modelo en cada una de las pruebas. La compuerta es una plancha metálica de $1/20''$ de espesor reforzada con perfiles de fierro de $1''$ (ángulos) y lleva cinta de caucho a los lados y en la parte inferior para evitar filtraciones. La elevación y disminución del nivel de agua, y con ello, del tirante de sumergimiento, se efectuará manipulando esta compuerta, consiguiéndose el máximo nivel de agua para la posición vertical de la compuerta y el mínimo nivel cuando esta está en posición horizontal. Esta manipulación se efectúa mediante una varilla de ranuras helicoidales que pivota en el eje de un apoyo transversal colocado en la parte superior del canal; un extremo de la varilla sujeta la parte superior de la compuerta tipo bisagra y el otro extremo lleva una manivela que permite el giro de la varilla para enroscar en una tuerca soldada al pivote y así abrir y cerrar la compuerta.

4.1.6 Drenaje del Lecho Móvil

El canal de experimentación tiene un orificio de 3/4" en la parte inferior del extremo final del volumen ocupado por el lecho móvil, el cual permitirá su drenaje. Entre el suelo y el orificio se colocó un pequeño volumen de material de filtro para impedir la evacuación del material de lecho móvil. A este orificio se adaptó un tubo, una válvula pequeña y una manguera que evacuaba hacia el canal de retorno a la cisterna. Este drenaje sencillo funcionó bastante bien durante todas las pruebas.

4.1.7 Ubicación del Modelo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica

El modelo hidráulico fue construido en la Sección de Investigación Sobre Modelos Reducidos del Laboratorio Nacional de Hidráulica, según se muestra en la figura 4.1.7. La alimentación de agua hacia el modelo se produce mediante una tubería de abastecimiento de 14" de diámetro que viene de un tanque elevado permanente del laboratorio (tanque elevado 1). Este tanque a su vez es abastecido de agua a través de una tubería de 14" de diámetro que viene de otro tanque elevado de mayor altura (tanque elevado 2) el cual recibe caudal bombeado desde la cisterna. El control del caudal que ingresa al modelo se efectúa al ingreso del tanque elevado 1, mediante unas válvulas de precisión ubicadas en la tubería que lo abastece, y para su medición se hace uso de un vertedero triangular de 53°08' instalado en el mismo tanque. Para el ingreso del caudal medido al modelo, se abre completamente la válvula de la tubería de abastecimiento. Dado que los tanques han sido o pueden ser utilizados para el abastecimiento de agua de otros modelos, debe asegurarse que bajo las condiciones de operación del modelo estudiado no se produzcan pérdidas de caudal hacia otras salidas; se sellaron entonces todos los conductos anejos al sistema de abastecimiento utilizado. A la salida del modelo el flujo es descargado hacia una trampa de sedimentos para retener el sedimento que pudiera salir del modelo. Esta trampa de sedimentos es un tanque bajo de 1,00 m de ancho, 1,50 m de largo y 0,40 m de altura; lateralmente cuenta con un vertedero rectangular de 0,50 m de largo que descarga el flujo hacia el canal de retorno a la cisterna para su recirculación. La trampa de sedimentos atenúa la contaminación del agua de las pruebas, la cual debe ser clara, y asimismo reduce la acumulación de finos en la cisterna.

4.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Los instrumentos de medición básicos y usuales en un laboratorio hidráulico han sido descritos en el capítulo 1. Varios de tales instrumentos y métodos han sido utilizados en la presente investigación de modo que la siguiente descripción no hará detalle de lo expuesto anteriormente. Si bien la medición de cada una de las variables responde a un procedimiento relativamente sencillo, el control de todas las variables en un proceso que depende del tiempo requiere de organización a fin de obtener resultados de buena calidad y confiables. Es un hecho que cada medición lleva consigo un margen de error y la acumulación de los errores de todas las variables puede llegar a ser considerable si no se efectúa su medición con cuidado; es por ello necesario seguir ciertas normas durante todas las pruebas, establecer al inicio la manera más efectiva de llevar a cabo tales mediciones y efectuarlas de la misma manera durante todo el proceso.

4.2.1 Variables Geométricas

Para la medición de la abertura de compuerta b se ha acoplado una regla graduada en el marco de la compuerta plana deslizante y se ha calibrado a fin de que pueda leerse la abertura de compuerta directamente en la parte superior. En el caso de la longitud de solado L , esta es fija para cada posición de la compuerta, es decir, la medición exacta ha sido ajustada durante la construcción del modelo, al efectuar las ranuras de las paredes laterales.

4.2.2 Caudal

Las pruebas han sido efectuadas estableciendo una serie de valores fijos del caudal Q , los cuales han sido utilizados durante toda la investigación. Como se ha indicado anteriormente, el caudal de ingreso es medido mediante un vertedero triangular de $53^{\circ}08'$ instalado en el tanque elevado 1 ubicado en la parte cubierta —bajo techo— del laboratorio. El control se efectúa mediante dos válvulas instaladas en la tubería

de abastecimiento a este tanque. Una de las válvulas cubre todo el diámetro de la tubería de 14" mientras que la segunda válvula permite el paso de caudales menores a través de un brazo paralelo de tubería de 4" de diámetro. Entonces, se establece aproximadamente el caudal utilizando la primera válvula y luego se ajusta al valor exacto utilizando la segunda válvula. Este ajuste depende de la lectura de la altura de agua en el vertedero de medición, la cual debe corresponder al caudal deseado según la tabla de calibración disponible para el tipo de vertedero utilizado. La lectura de la altura de agua en el vertedero de medición se efectúa mediante un limnómetro, según procedimientos ya descritos. En resumen: a partir de la tabla de calibración se obtiene la altura de agua respecto al vértice del vertedero que corresponde al caudal deseado y se ubica la punta del limnómetro indicando como lectura tal altura de agua; el ajuste del caudal de ingreso mediante la segunda válvula se consigue cuando el nivel de agua iguala el nivel de la punta del limnómetro. En este caso se utilizó un limnómetro con aguja tipo gancho.

4.2.3 Tirantes de Agua

Se ha medido los tirantes de agua utilizando un limnómetro pequeño. Se han efectuado dos mediciones, una para el tirante o carga de agua aguas arriba de la compuerta plana deslizante H , y otra para el tirante de sumergimiento aguas abajo h . Se ha trabajado con un único tirante de sumergimiento en todas las pruebas, de 30 cm. Para su control se ha utilizado además una mira vertical dibujada sobre la pared, con graduaciones cada 1,0 cm, habiendo establecido los niveles o elevaciones haciendo uso de un nivel de precisión. Para la medición de los tirantes o cargas de agua con el limnómetro se tuvo en consideración el nivel de las paredes laterales sobre las cuales se apoya el limnómetro a fin de establecer las mediciones respecto al fondo del solado rígido —el cual es el nivel de referencia cero.

4.2.4 Perfiles de Erosión

Las pruebas han sido efectuadas según un modelo bidimensional, de modo que la erosión producida es también bidimensional y sólo debe hacerse una medición de su

perfil a lo largo de su eje central. Aún así, para visualización rápida de las dimensiones del perfil y como ayuda en las fotografías tomadas, se ha dibujado un sistema coordinado en la pared de vidrio con origen en la arista del extremo final del solado de protección. Este origen también es considerado en la medición efectuada sobre el eje. Al igual que en el caso de los tirantes de agua, el nivel del lecho móvil erosionado ha sido medido con un limnómetro, pero en este caso su punta fue adaptada para conseguir llegar hasta el fondo de los perfiles de erosión producidos. El limnómetro corre sobre la parte superior de las paredes del canal, las cuales están perfectamente niveladas pues finalmente se desea obtener las profundidades de erosión respecto del nivel del solado rígido (nivel de referencia cero). Las mediciones han sido efectuadas cada 2,0 cm a lo largo del perfil, siguiendo las marcas graduadas dibujadas sobre las paredes laterales para tal fin. La medición del perfil de erosión se efectúa con el material móvil en reposo, sin flujo, para evitar afectar el desarrollo de la erosión debido a la interacción del flujo con la punta del limnómetro. A partir de los perfiles de erosión se determinó la profundidad de erosión máxima s . Debe indicarse aquí que en la mayoría de investigaciones actuales la medición se efectúa en tiempo real, haciendo uso de técnicas que no afectan el flujo ni el fenómeno medido, de modo que no es necesario detener el funcionamiento del modelo, lo cual permite un ahorro bastante considerable de tiempo y trabajo.

4.3 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

Construido el modelo e instalados los instrumentos de medición debe verificarse el buen funcionamiento del modelo, es decir, que reproduzca adecuadamente el fenómeno estudiado. Esta etapa es denominada de calibración del modelo y puede significar un cierto tiempo adicional y modificaciones constructivas. Luego, una vez que se tiene seguridad de que el modelo producirá resultados confiables, se procede a ejecutar las pruebas según un cronograma que considere el mejor uso de los recursos. Estas pruebas deben ser planificadas con cuidado, teniendo en consideración el análisis paralelo de los resultados que podrían significar una reducción en el número de pruebas necesarias para llegar a una solución, o que permitirían detectar algún error que aún puede ser subsanado, etc. Terminadas las pruebas, el modelo debe ser conservado a fin de ejecutar pruebas adicionales —de darse el caso.

Como se ha venido indicando, se trata del modelamiento bidimensional del flujo de un chorro de agua que sale con cierta velocidad por una abertura de compuerta dada y fluye sumergido sobre un solado rígido de determinada longitud y hacia un lecho móvil de material no cohesivo de características conocidas, el cual será erosionado. Las variables que participan en el proceso de erosión localizada estudiado son: la abertura de compuerta b , la velocidad a la salida del chorro U_o , la longitud del solado L , el tirante de sumergimiento h , el diámetro representativo de las partículas de sedimento que conforman el lecho móvil d_{95} , la densidad del agua ρ , la densidad de los sedimentos ρ_s , la aceleración de la gravedad g , el tiempo t , y como variable dependiente: la profundidad máxima de erosión s .

4.3.1 Calibración del Modelo

En la presente investigación la calibración del modelo tomó cierto tiempo pues no se producía el chorro y el perfil de erosión *bidimensionales* requeridos. Se iniciaron las pruebas con una longitud de solado de 120 cm y la erosión se formaba mostrando un efecto de pared muy pronunciado, siendo más profunda en la zona adyacente a las paredes y formándose dunas hacia el eje central del canal. Esta situación puede ser observada en la fotografía de la figura 4.3.1 donde se muestra parte del solado rígido y la erosión local tridimensional adyacente a cada una de las paredes del canal. Las líneas blancas representan curvas de nivel cada 1 cm.

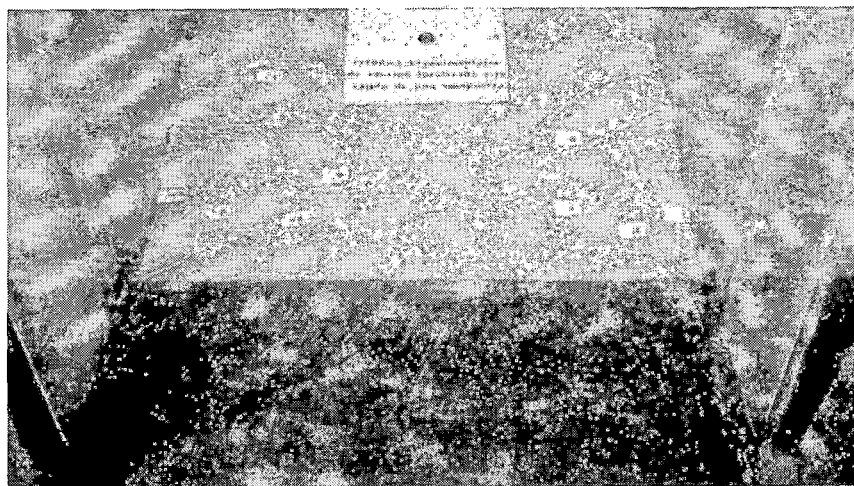


Figura 4.3.1 Erosión Tridimensional en Periodo de Calibración del Modelo

Se hicieron varias modificaciones al ingreso del modelo sin conseguir resultado alguno, lo cual hacía suponer que no se trataba de un efecto desde aguas arriba. Además, haciendo uso de trazas* se observó que el flujo aguas arriba de la compuerta sí era bidimensional, no así aguas abajo. Se hicieron mediciones de velocidad a lo largo del solado bajo las condiciones de modelamiento (chorro sumergido que sale por la abertura de compuerta) y se halló que el flujo a la derecha tenía mayor velocidad que a la izquierda y la mínima velocidad se presentaba al centro. Al hacer las mismas mediciones pero sin compuerta, es decir, como canal, las velocidades al centro y lados eran prácticamente iguales. Ello indicaba que el problema no estaba ni en el flujo desde aguas arriba ni en desniveles o imperfecciones del solado. El problema se debía a la operación de la compuerta y al flujo sumergido sobre el solado de protección. Era probable que una longitud de solado demasiado larga permitiera que el flujo divague produciéndose vórtices de eje vertical sobre el solado que se propagaban hacia el lecho móvil; entonces se optó por reducir la longitud del solado. Se modificó la posición de la compuerta plana deslizante para una longitud de solado de 40 cm obteniéndose finalmente el flujo bidimensional. En la figura 4.3.2 se muestra la fotografía de una prueba realizada con longitud de solado de 1,20 m.

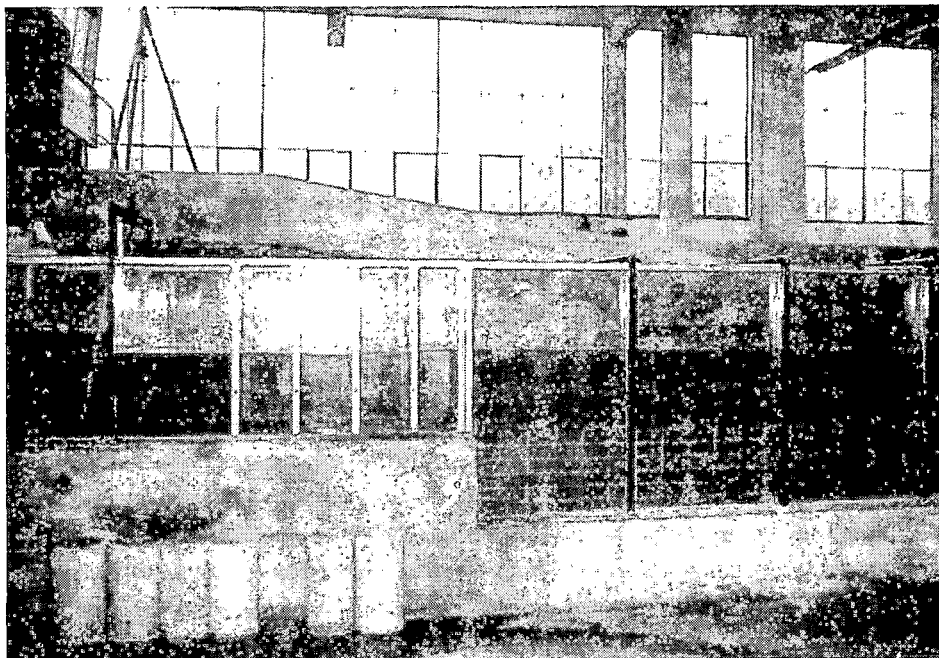


Figura 4.3.2 Vista Lateral del Modelo en Operación de Prueba

* La traza es una línea instantánea cuyos puntos están ocupados por todas las partículas que pasaron por cierto punto del campo de flujo. Suele dibujarse depositando tinta en un determinado punto; en flujo permanente la traza coincide con la línea de corriente.

En la figura 4.3.3 se muestra la fotografía de una prueba con longitud de solado de 40 cm observándose una erosión localizada bidimensional.

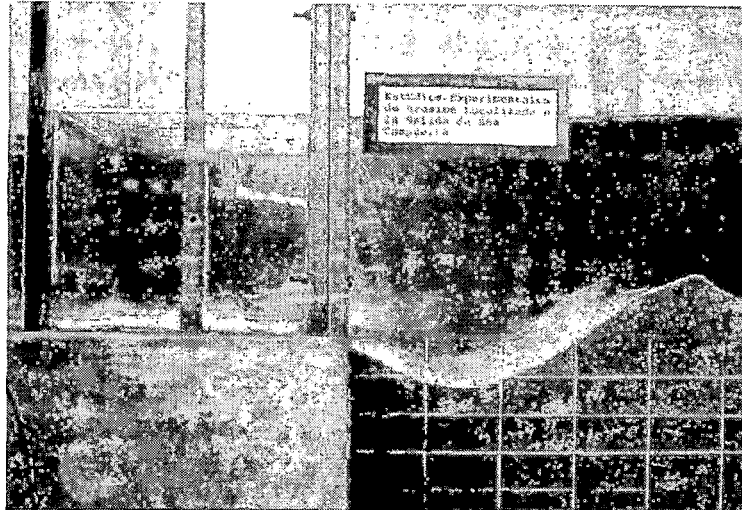


Figura 4.3.3 Erosión Localizada Bidimensional
Longitud de Solado 40 cm

4.3.2 Rango de Variación de las Variables Ensayadas

Como en toda prueba experimental el fenómeno es repetido cierto número de veces para observar la variación de la variable dependiente ante cambios en las variables independientes involucradas. Cada repetición es una corrida del modelo. En este caso, primero se efectuaron corridas ante las mismas condiciones geométricas y de flujo, variando únicamente el tiempo; usualmente se consideró tiempos de 4 min, 8 min, 16 min, 32 min, 64 min, 128 min y 192 min. Luego, sin variar las condiciones geométricas, se variaron las condiciones de flujo, lo que implicaba variar sólo el caudal de flujo en el modelo pues el tirante de sumergimiento se mantuvo constante en todas las pruebas (30 cm) y el tirante de agua aguas arriba de la compuerta plana deslizante era dependiente del caudal. Los caudales considerados son: 10,02 l/s; 12,35 l/s; 15,00 l/s; 17,60 l/s; 20,05 l/s; 22,60 l/s; 25,04 l/s; y 27,50 l/s. En cada caso se efectuaron las pruebas para los tiempos ya indicados. Se procedió luego a variar las condiciones geométricas; se varió la abertura de compuerta y en cada caso se efectuaron pruebas para los distintos caudales y tiempos; las aberturas de compuerta utilizadas son: 5 cm, 6 cm, 7 cm y 8 cm. Todas estas pruebas fueron efectua-

das con una única longitud de solado; entonces se repitieron las pruebas variando la longitud de solado. Se trabajó con longitudes de solado de 40 cm, 60 cm y 80 cm. Las pruebas así realizadas permitieron obtener perfiles de erosión en el suelo ensayado; según ha sido indicado, se utilizaron dos tipos de suelo: Suelo 1 y Suelo 2, cuyas características han sido descritas anteriormente.

Los valores de las variables independientes indicados constituyen toda la gama considerada para los ensayos, sin embargo, no todos han sido utilizados en todas las pruebas. En algunos casos, los caudales pequeños permitían la ocurrencia de efectos tridimensionales, al igual que la longitud de solado grande. En el caso de la longitud de solado de 80 cm se hicieron pocas pruebas justamente porque las condiciones de flujo se apartaban del modelo bidimensional. Asimismo, dado que el uso de parámetros adimensionales permite disminuir el número de variables a variar durante las pruebas, es decir, se consigue parámetros similares con distintas combinaciones de las variables, no era necesario ensayar todas las variables posibles sino el mayor rango posible de parámetros adimensionales. Esto permitió eliminar algunas pruebas innecesarias.

4.3.3 Descripción de una Corrida Típica en el Modelo

Antes de iniciar una corrida se enrasaba el material del lecho móvil con el nivel del solado, sin compactar. Dado que el material erosionado no se desplazaba lejos de la duna y no se observaba pérdida de volumen del material, se puede afirmar que el material que pueda haber salido del modelo era material muy fino, lavado por el agua, de modo que en cada corrida sólo se producía un desplazamiento de material dentro del modelo y su retorno al estado inicial (plano) era sencillo. El canal era entonces llenado lentamente con agua utilizando la válvula de abastecimiento al canal; una vez que el lecho móvil se saturaba y se tenía una lámina de agua sobre todo el fondo del canal, se permitía ingresar mayor caudal manteniendo la compuerta con su abertura máxima a fin de no producir condiciones que provoquen erosión local antes de iniciar la prueba. A medida que se requería mayor caudal debía prenderse la bomba que abastece al tanque elevado 2 y así surtir de agua al tanque elevado 1. Abierta totalmente la válvula de abastecimiento al modelo, se regulaba el caudal

requerido para la prueba siguiendo el procedimiento antes indicado. Paralelamente, la compuerta tipo bisagra a la salida era regulada a fin de obtener el tirante de sumergimiento de 30 cm. Hasta este momento no se producía erosión pues la velocidad de flujo a través de la abertura de compuerta era baja, con una carga de agua (diferencia entre el nivel de agua aguas arriba de la compuerta y el nivel de sumergimiento) pequeña. En estas condiciones de flujo permanente, con el caudal y tirante de sumergimiento requeridos, se iniciaba la prueba: se procedía a cerrar rápidamente la compuerta plana deslizante hasta la abertura deseada y se empezaba a contabilizar el tiempo. El establecimiento de la abertura de compuerta no tomaba más de 15 segundos. Inicialmente el tirante de sumergimiento disminuye y luego vuelve al valor de 30 cm inicial, lo cual sugiere que la variación en el tiempo del flujo en la zona erosionada afecta al flujo global sólo durante una etapa inicial corta, luego su efecto se reduce solamente a tal zona de erosión. Entonces se medía el tirante de agua aguas arriba de la compuerta plana deslizante, o la carga de agua. Transcurrido el tiempo que se deseaba ensayar, en el momento justo, se cerraba la válvula de abastecimiento al modelo y se abría la compuerta plana deslizante nuevamente. Así el proceso de erosión era detenido y se procedía a medir el perfil de erosión. La medición del perfil de erosión era efectuada bajo agua, mientras se drenaba el modelo, lo cual tomaba un cierto tiempo. Cuando la medición tardaba más que el drenaje se detenía el drenaje para continuar haciendo la medición bajo agua. Se prefirió hacer las mediciones bajo agua para evitar la deformación del perfil de erosión por efecto del drenaje. Cabe indicar que al detener el flujo en el modelo, el material en suspensión se sedimenta sobre la zona erosionada y, aunque el volumen no es muy significativo, debe indicarse que la medición del perfil corresponde al material transportado fuera de la zona erosionada y no al material puesto en movimiento.

En algunas pruebas se alcanzó una condición para la cual parte de la duna del perfil de erosión se desmoronaba y caía hacia la zona erosionada. Inmediatamente era detenido el funcionamiento del modelo, registrándose el tiempo transcurrido y midiéndose el perfil de erosión hasta la ubicación de la profundidad máxima. Durante las pruebas no se tenía seguridad del significado de este suceso, pues no seguía un patrón ordenado o gradual como hasta entonces se había observado. No se permitió continuar el proceso de erosión luego de desmoronarse la duna para poder efectuar la medición del perfil.

En varias pruebas se anotó la abertura de compuerta para la cual se iniciaba la erosión del material de lecho móvil; el valor es aproximado pero suele corresponder a la misma velocidad de salida del chorro en las diferentes pruebas para el mismo suelo.

En las figuras 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, y 4.3.7 se muestra el desarrollo de un perfil de erosión para un caudal de 15,00 l/s, una abertura de compuerta de 6,0 cm y una longitud de solado de 40 cm en el suelo 1. Los tiempos correspondientes son de 8 min, 16 min, 32 min y 64 min. Como referencia, la cuadrícula dibujada sobre la pared de vidrio corresponde a rectángulos de 5 cm por 10 cm.

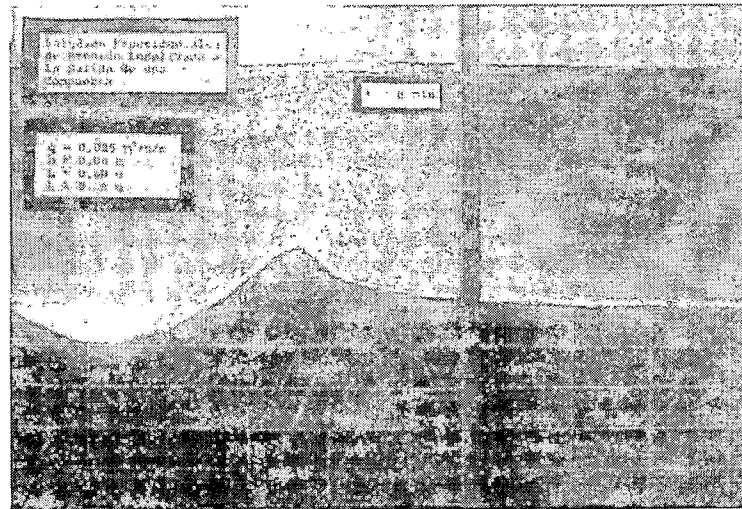


Figura 4.3.4 Perfil de Erosión Prueba N° 8

8 minutos

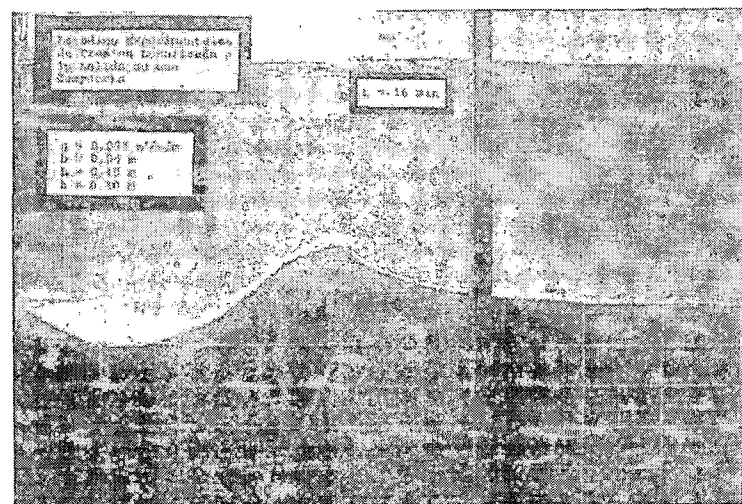


Figura 4.3.5 Perfil de Erosión Prueba N° 9

16 minutos

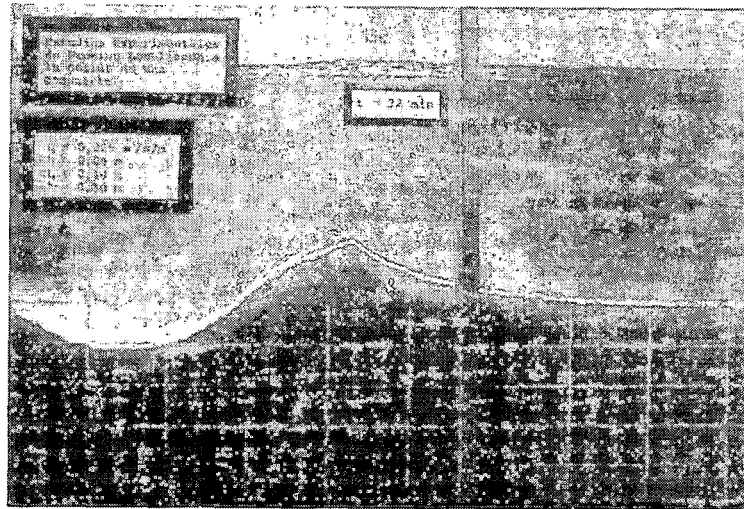


Figura 4.3.6 Perfil de Erosión Prueba N° 10
32 minutos

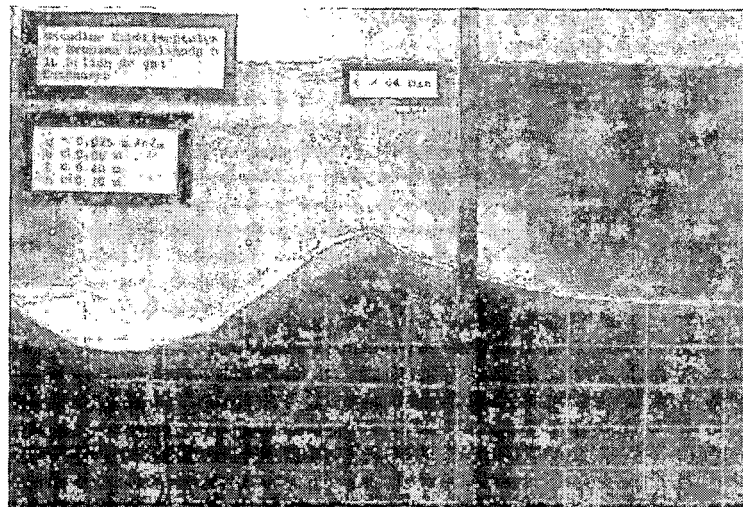


Figura 4.3.7 Perfil de Erosión Prueba N° 11
64 minutos

Durante las pruebas se hizo uso de trazas para observar la formación de los vórtices de eje horizontal en el perfil de erosión, zonas de concentración de velocidades y características adicionales del flujo en el perfil de erosión. El movimiento de los sedimentos en suspensión también permitía describir el flujo mediante líneas de trayectoria*.

* La línea de trayectoria es el lugar geométrico de los puntos recorridos por una partícula dada que viaja en un campo de flujo.

Capítulo 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales deben ser analizados en el contexto de un análisis teórico que brinde sustento físico a las expresiones que se obtengan entre los parámetros que intervienen en el fenómeno. Debe evitarse trabajar los resultados con el fin de obtener ecuaciones empíricas que simplemente relacionen estos parámetros —aún si el ajuste de los datos observados resulte casi perfecto— pues estas describirían el fenómeno sólo en el modelo. El objetivo principal de toda investigación básica en ingeniería hidráulica es aportar a la descripción del fenómeno mediante expresiones que sean de aplicación general y no particular; sólo entonces los aportes de numerosas investigaciones podrán ser hilvanados para ir constituyendo la base teórica del fenómeno estudiado, la cual servirá como marco de referencia a las futuras investigaciones. Los casos más complejos pueden resultar en un ciclo continuo de aportes y mejoras hacia su conocimiento, y aún aquellos acercamientos que luego resulten errados forman parte de este ciclo y son de importancia para la investigación. Para el análisis de los resultados es imprescindible el uso de herramientas matemáticas y de cómputo; esto permite evaluar rápidamente el ajuste de los resultados a las ecuaciones propuestas en el análisis teórico y contribuye a disminuir el enorme trabajo que significaría el hacer pequeños cambios en el tratamiento de los resultados. Asimismo, permite analizar los resultados en grupos para poder efectuar comparaciones e identificar el efecto de ciertos parámetros antes de integrar todos los resultados y especificar una solución global o descripción general. Se espera que las expresiones obtenidas siguiendo estos lineamientos sean válidas ante otras condiciones similares.

En adelante se presentarán los resultados obtenidos directamente de cada prueba y la serie de cálculos efectuados con estos. Cuando el valor de las variables o parámetros considerados son importantes o representativos, estos son presentados de manera tabular; sin embargo, en algunos casos se ha desestimado presentar el valor que toman los resultados (medidos o calculados) y estos han sido plasmados directamente en gráficos; en los gráficos puede observarse claramente el rango de variación de tales valores y, aquellas características importantes, sea porque serán utilizadas posteriormente o porque representan el caso, son entonces presentadas en forma tabular. Esto permite reducir enormemente el volumen de cuadros de resultados pues las pruebas con sus respectivas mediciones producen una gran cantidad de números cuya visualización como tales no resulta siempre práctica.

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS

Se realizó un total de 124 pruebas o corridas del modelo, las cuales corresponden a 42 esquemas de flujo, cada uno de ellos efectuado para diferentes intervalos de tiempo, según se muestra en el cuadro 5.1.1. La mayor parte de las pruebas fueron efectuadas con el suelo 1 (un total de 101 pruebas), mientras que con el suelo 2 se efectuaron sólo 23 pruebas; la diferencia se debe principalmente a que en el suelo 1 se realizaron pruebas con tres diferentes longitudes de solado (44 pruebas con la longitud de solado de 40 cm; 48 pruebas con la longitud de solado de 60 cm; y 9 pruebas con la longitud de solado de 80 cm), mientras que en el suelo 2 todas las pruebas fueron efectuadas con una longitud de solado de 40 cm. Esta distribución se basó en que el efecto de la longitud de solado sería analizado sólo en el suelo 1, para luego analizar el efecto de la gradación al integrar los resultados obtenidos en el suelo 1 con los obtenidos en el suelo 2. El resultado de cada una de las pruebas efectuadas es una erosión localizada bidimensional cuyo perfil fue medido en su eje central, según ha sido indicado en el capítulo 4; la velocidad de salida del chorro no ha sido medida sino calculada a partir de otras variables medidas y, según el tratamiento que se realizará a los resultados, se han efectuado mediciones para determinar las condiciones para las cuales se inicia el movimiento de las partículas del lecho móvil. Estas variables forman parte de los resultados obtenidos directamente de las pruebas y se presentan a continuación.

Cuadro 5.1.1
Esquemas de Flujo en las Pruebas

Esquema	Prueba	Suelo	Q (l/s)	b (cm)	L (cm)	h (cm)	Dh (cm)	t (min)	q (m ² /s)	U _o (m/s)
1	1	1	10.02	6.0	40.0	30.0	0.93	16	0.017	0.278
2	2	1	12.35	6.0	40.0	30.0	1.51	16	0.021	0.343
3	3	1	15.00	5.0	40.0	30.0	3.10	8	0.025	0.500
	4	1	15.00	5.0	40.0	30.0	3.10	16	0.025	0.500
	5	1	15.00	5.0	40.0	30.0	3.10	32	0.025	0.500
	6	1	15.00	5.0	40.0	30.0	3.10	64	0.025	0.500
4	7	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	4	0.025	0.417
	8	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	8	0.025	0.417
	9	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	16	0.025	0.417
	10	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	32	0.025	0.417
	11	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	64	0.025	0.417
	12	1	15.00	6.0	40.0	30.0	2.10	128	0.025	0.417
5	13	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	4	0.025	0.357
	14	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	8	0.025	0.357
	15	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	16	0.025	0.357
	16	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	32	0.025	0.357
	17	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	64	0.025	0.357
	18	1	15.00	7.0	40.0	30.0	1.44	128	0.025	0.357
6	19	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	4	0.025	0.313
	20	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	8	0.025	0.313
	21	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	16	0.025	0.313
	22	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	32	0.025	0.313
	23	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	64	0.025	0.313
	24	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	128	0.025	0.313
	25	1	15.00	8.0	40.0	30.0	1.07	192	0.025	0.313
7	26	1	17.60	6.0	40.0	30.0	2.91	16	0.029	0.489
8	27	1	20.05	6.0	40.0	30.0	3.74	16	0.033	0.557
	28	1	20.05	6.0	40.0	30.0	3.74	32	0.033	0.557
	29	1	20.05	6.0	40.0	30.0	3.74	64	0.033	0.557
	30	1	20.05	6.0	40.0	30.0	3.74	128	0.033	0.557
9	31	1	20.05	7.0	40.0	30.0	2.65	8	0.033	0.477
	32	1	20.05	7.0	40.0	30.0	2.65	16	0.033	0.477
	33	1	20.05	7.0	40.0	30.0	2.65	32	0.033	0.477
	34	1	20.05	7.0	40.0	30.0	2.65	64	0.033	0.477
10	35	1	20.05	8.0	40.0	30.0	1.94	8	0.033	0.418
	36	1	20.05	8.0	40.0	30.0	1.94	16	0.033	0.418
	37	1	20.05	8.0	40.0	30.0	1.94	32	0.033	0.418
	38	1	20.05	8.0	40.0	30.0	1.94	64	0.033	0.418
11	39	1	22.60	6.0	40.0	30.0	4.74	16	0.038	0.628
12	40	1	25.04	6.0	40.0	30.0	5.95	8	0.042	0.696
	41	1	25.04	6.0	40.0	30.0	5.95	16	0.042	0.696
	42	1	25.04	6.0	40.0	30.0	5.95	32	0.042	0.696
	43	1	25.04	6.0	40.0	30.0	5.95	64	0.042	0.696
	44	1	25.04	6.0	40.0	30.0	5.95	106	0.042	0.696
13	45	1	10.02	6.0	60.0	30.0	0.88	16	0.017	0.278
14	46	1	12.35	6.0	60.0	30.0	1.34	16	0.021	0.343
15	47	1	15.00	6.0	60.0	30.0	2.01	16	0.025	0.417
16	48	1	17.40	6.0	60.0	30.0	2.69	16	0.029	0.483

Cuadro 5.1.1
Esquemas de Flujo en las Pruebas

Esquema	Prueba	Suelo	Q (l/s)	b (cm)	L (cm)	h (cm)	Dh (cm)	t (min)	q (m ² /s)	U _o (m/s)
17	49	1	17.60	7.0	60.0	30.0	1.97	8	0.029	0.419
	50	1	17.60	7.0	60.0	30.0	1.97	16	0.029	0.419
	51	1	17.60	7.0	60.0	30.0	1.97	32	0.029	0.419
	52	1	17.60	7.0	60.0	30.0	1.97	64	0.029	0.419
18	53	1	20.05	6.0	60.0	30.0	3.60	16	0.033	0.557
	54	1	20.05	6.0	60.0	30.0	3.60	32	0.033	0.557
	55	1	20.05	6.0	60.0	30.0	3.60	64	0.033	0.557
	56	1	20.05	6.0	60.0	30.0	3.60	90.5	0.033	0.557
19	57	1	20.05	7.0	60.0	30.0	2.55	8	0.033	0.477
	58	1	20.05	7.0	60.0	30.0	2.55	16	0.033	0.477
	59	1	20.05	7.0	60.0	30.0	2.55	32	0.033	0.477
	60	1	20.05	7.0	60.0	30.0	2.55	64	0.033	0.477
20	61	1	20.05	8.0	60.0	30.0	1.90	8	0.033	0.418
	62	1	20.05	8.0	60.0	30.0	1.90	16	0.033	0.418
	63	1	20.05	8.0	60.0	30.0	1.90	32	0.033	0.418
	64	1	20.05	8.0	60.0	30.0	1.90	64	0.033	0.418
21	65	1	22.60	6.0	60.0	30.0	4.63	8	0.038	0.628
	66	1	22.60	6.0	60.0	30.0	4.63	16	0.038	0.628
	67	1	22.60	6.0	60.0	30.0	4.63	32	0.038	0.628
	68	1	22.60	6.0	60.0	30.0	4.63	48.5	0.038	0.628
22	69	1	22.60	7.0	60.0	30.0	3.20	8	0.038	0.538
	70	1	22.60	7.0	60.0	30.0	3.20	16	0.038	0.538
	71	1	22.60	7.0	60.0	30.0	3.20	32	0.038	0.538
	72	1	22.60	7.0	60.0	30.0	3.20	61.5	0.038	0.538
23	73	1	22.60	8.0	60.0	30.0	2.40	8	0.038	0.471
	74	1	22.60	8.0	60.0	30.0	2.40	16	0.038	0.471
	75	1	22.60	8.0	60.0	30.0	2.40	32	0.038	0.471
	76	1	22.60	8.0	60.0	30.0	2.40	64	0.038	0.471
24	77	1	25.04	6.0	60.0	30.0	5.70	8	0.042	0.696
	78	1	25.04	6.0	60.0	30.0	5.70	16	0.042	0.696
	79	1	25.04	6.0	60.0	30.0	5.70	22.5	0.042	0.696
25	80	1	25.04	7.0	60.0	30.0	4.00	8	0.042	0.596
	81	1	25.04	7.0	60.0	30.0	4.00	16	0.042	0.596
	82	1	25.04	7.0	60.0	30.0	4.00	32	0.042	0.596
	83	1	25.04	7.0	60.0	30.0	4.00	37	0.042	0.596
26	84	1	27.50	6.0	60.0	30.0	6.88	8	0.046	0.764
	85	1	27.50	6.0	60.0	30.0	6.88	12.5	0.046	0.764
27	86	1	27.50	7.0	60.0	30.0	4.90	8	0.046	0.655
	87	1	27.50	7.0	60.0	30.0	4.90	16	0.046	0.655
	88	1	27.50	7.0	60.0	30.0	4.90	21	0.046	0.655
28	89	1	12.35	6.0	60.0	25.0	1.27	16	0.021	0.343
29	90	1	15.00	6.0	60.0	25.0	1.95	16	0.025	0.417
30	91	1	17.60	6.0	60.0	25.0	2.63	16	0.029	0.489
31	92	1	20.05	6.0	60.0	25.0	3.40	16	0.033	0.557
32	93	1	15.00	6.0	80.0	30.0	1.91	16	0.025	0.417
	94	1	15.00	6.0	80.0	30.0	1.91	32	0.025	0.417
	95	1	15.00	6.0	80.0	30.0	1.91	64	0.025	0.417
33	96	1	15.00	7.0	80.0	30.0	1.40	64	0.025	0.357

Cuadro 5.1.1
Esquemas de Flujo en las Pruebas

Esquema	Prueba	Suelo	Q (l/s)	b (cm)	L (cm)	h (cm)	Dh (cm)	t (min)	q (m ² /s)	U _o (m/s)
34	97	1	17.60	6.0	80.0	30.0	2.63	8	0.029	0.489
	98	1	17.60	6.0	80.0	30.0	2.63	16	0.029	0.489
	99	1	17.60	6.0	80.0	30.0	2.63	32	0.029	0.489
35	100	1	17.60	7.0	80.0	30.0	1.90	64	0.029	0.419
36	101	1	22.60	6.0	80.0	30.0	4.23	16	0.038	0.628
37	102	2	15.00	6.0	40.0	30.0	2.12	8	0.025	0.417
	103	2	15.00	6.0	40.0	30.0	2.12	16	0.025	0.417
	104	2	15.00	6.0	40.0	30.0	2.12	32	0.025	0.417
	105	2	15.00	6.0	40.0	30.0	2.12	64	0.025	0.417
38	106	2	20.05	6.0	40.0	30.0	3.84	8	0.033	0.557
	107	2	20.05	6.0	40.0	30.0	3.84	16	0.033	0.557
	108	2	20.05	6.0	40.0	30.0	3.84	32	0.033	0.557
	109	2	20.05	6.0	40.0	30.0	3.84	64	0.033	0.557
39	110	2	20.05	7.0	40.0	30.0	2.70	8	0.033	0.477
	111	2	20.05	7.0	40.0	30.0	2.70	16	0.033	0.477
	112	2	20.05	7.0	40.0	30.0	2.70	32	0.033	0.477
40	113	2	25.04	6.0	40.0	30.0	6.04	8	0.042	0.696
	114	2	25.04	6.0	40.0	30.0	6.04	16	0.042	0.696
	115	2	25.04	6.0	40.0	30.0	6.04	32	0.042	0.696
	116	2	25.04	6.0	40.0	30.0	6.04	64	0.042	0.696
41	117	2	25.04	7.0	40.0	30.0	4.34	8	0.042	0.596
	118	2	25.04	7.0	40.0	30.0	4.34	16	0.042	0.596
	119	2	25.04	7.0	40.0	30.0	4.34	32	0.042	0.596
	120	2	25.04	7.0	40.0	30.0	4.34	64	0.042	0.596
42	121	2	25.04	8.0	40.0	30.0	3.20	8	0.042	0.522
	122	2	25.04	8.0	40.0	30.0	3.20	16	0.042	0.522
	123	2	25.04	8.0	40.0	30.0	3.20	32	0.042	0.522
	124	2	25.04	8.0	40.0	30.0	3.20	64	0.042	0.522

Q, caudal

b, abertura de la compuerta

L, longitud del solado

h, tirante de sumergimiento

Dh, diferencia entre el nivel de agua aguas arriba de la compuerta y el nivel de agua de sumergimiento; carga de agua que produce el flujo

t, tiempo

q, caudal por unidad de ancho o caudal específico

U_o, velocidad de salida del chorro determinada según la relación caudal - área.

5.1.1 Perfiles de Erosión

La medición de los perfiles de erosión ha sido efectuada cada 2 cm en el eje horizontal, iniciando las mediciones en el extremo final del solado de protección (inicio del lecho móvil). Para graficar cada perfil de erosión se completó sus coordenadas en el interior de cada tramo de 2 cm medido; para ello se efectuó una interpolación con el método de splines cúbicos en un intervalo de 0,1 cm. En cada perfil así completado se obtuvo la profundidad máxima de erosión y la distancia horizontal hasta la cresta de la duna. En la figura 5.1.1 se muestra el desarrollo en el tiempo del perfil de erosión para el esquema de flujo 4, pruebas 7 a 12, con indicación de los valores de las variables independientes para las cuales fue obtenido y el valor de las variables dependientes (dimensiones de cada perfil de erosión) resultantes. Este desarrollo es típico de modo que los perfiles de erosión obtenidos en todas las pruebas han sido plasmados en 42 gráficos, uno para cada esquema de flujo, los cuales se presentan en el anexo B.

5.1.2 Velocidad de Salida del Chorro

En todas las pruebas el flujo a través de una abertura de compuerta dada tiene las características de un chorro de agua horizontal sumergido cuya velocidad provoca una diferencia entre el nivel de agua aguas arriba de la compuerta y el nivel de sumergimiento aguas abajo —comúnmente denominada carga de agua que produce el flujo— habiendo una relación entre estas (velocidad y carga) dada por la ecuación de Torricelli, $\sqrt{2g\Delta h}$. De otro lado, la velocidad del chorro se relaciona con el caudal y el área de flujo mediante la ecuación de continuidad, q/b . Se puede intuir que los valores de velocidad de salida del chorro estimados mediante las dos ecuaciones indicadas evidenciará una relación constante entre ellos, lo cual puede ser observado en la figura 5.1.2, donde se ha graficado estos valores para el total de las pruebas. Si se hubiese obtenido agrupamientos en el gráfico, se tendría entonces que ciertas características influyen sobre la relación entre ambas estimaciones, pero la relación constante obtenida es clara y puede escogerse sólo una de las estimaciones y obviar la otra. Se ha optado por utilizar la estimación según la ecuación de continuidad.

Figura 5.1.1
Perfiles de Erosión Esquema de Flujo 4
Suelo 1 L=40 cm b=6 cm h=30 cm $U_o=0.417$ m/s

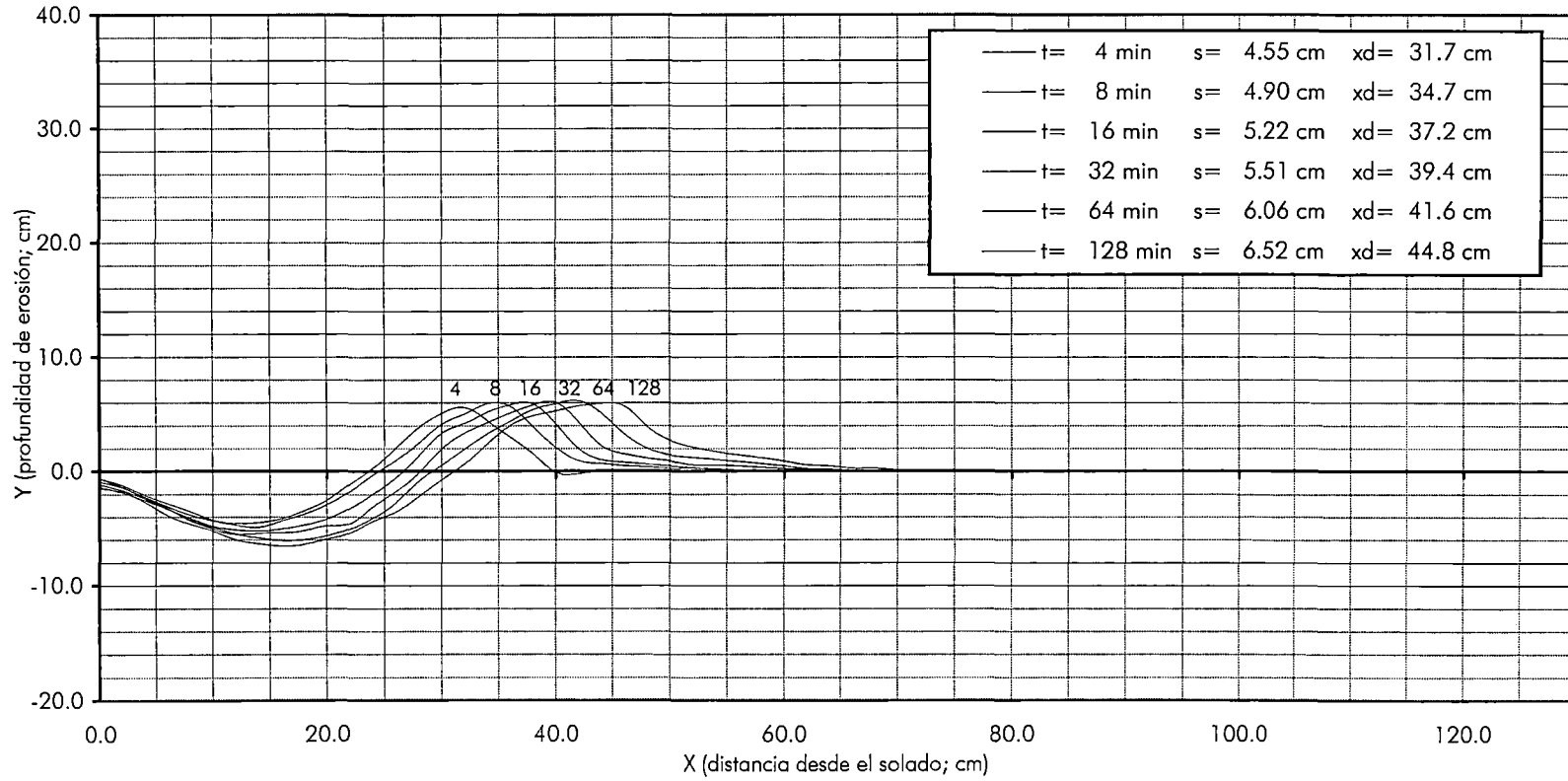
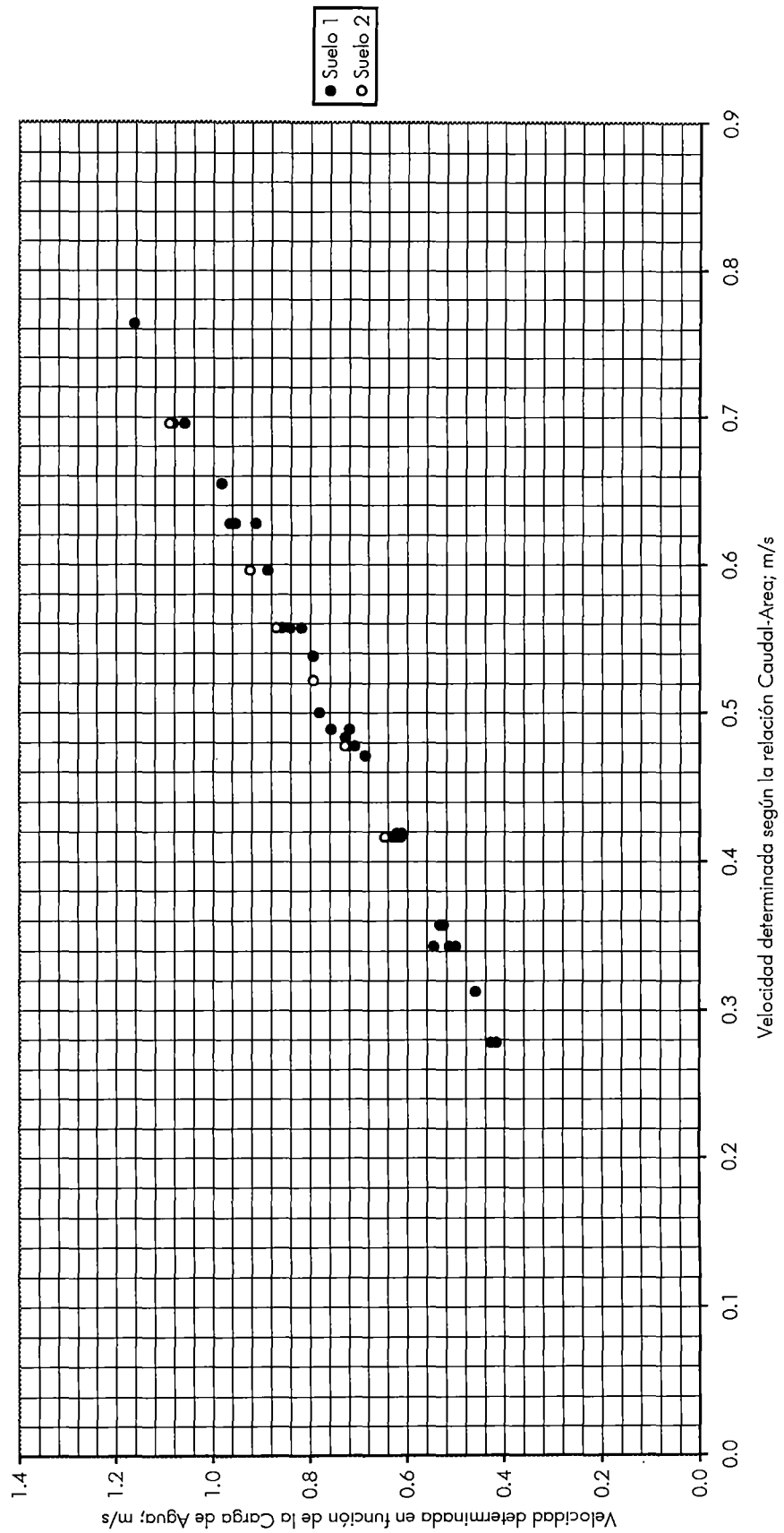


Figura 5.1.2
Relación entre los Valores de Velocidad Obtenidos
a Partir del Caudal y de la Carga de Agua



5.1.3 Velocidad de Iniciación del Movimiento

La velocidad de iniciación del movimiento ha sido determinada en forma aproximada. Se midió la abertura de compuerta para la cual empezaban a moverse las partículas de sedimento del lecho móvil ante cierto caudal de flujo. La medición no fue efectuada de manera exacta porque la compuerta era cerrada rápidamente hasta la abertura deseada para la prueba y sobretodo porque la determinación del instante en el cual se inicia el movimiento está sujeta a error de apreciación. En el cuadro 5.1.2 se muestra los resultados obtenidos para el suelo 1. La velocidad de iniciación del movimiento es aproximadamente la misma en todos los casos, lo cual es lógico pues esta depende del tipo de suelo. Se utilizará el valor mínimo y, dado que el suelo 2 está compuesto, en promedio, de los mismos tamaños de partícula, se ha utilizado el mismo valor de la velocidad de iniciación del movimiento en todas las pruebas.

Cuadro 5.1.2

Velocidad de Chorro que Produce la Iniciación del Movimiento

Q (m ³ /s)	b (m)	U _o (m/s)
0,0150	0,15	0,167
0,0176	0,17	0,173
0,0201	0,20	0,168

5.2 TRABAJO DE LOS RESULTADOS SEGÚN ANÁLISIS TEÓRICO

Los resultados obtenidos durante las pruebas han sido trabajados siguiendo las pautas dadas por el análisis teórico expuesto en el capítulo 3. Se hace referencia a los parámetros calculados en el proceso sin detalle de las expresiones utilizadas pues estas han sido presentadas en el mencionado capítulo. Se ha trabajado separadamente los resultados obtenidos con los diferentes suelos y las diferentes longitudes de solado utilizados; según ha sido indicado, esto permite observar la influencia que pudiera tener cada una de estas variables, no aparente al trabajar los resultados de manera global. Se presenta los resultados finales, luego de hacer una serie de modificaciones a fin de hallar la mejor solución.

5.2.1 Características Representativas del Material de Lecho

Se desea verificar que el diámetro que representa a una mezcla de sedimentos desde el punto de vista de su erosión local es el diámetro d_{95} , sin consideración adicional de la gradación. Este diámetro es obtenido a partir de la distribución granulométrica graficada que se utilizó para preparar cada suelo. Haciendo uso de herramientas de cómputo simples se efectuaron mediciones en el dibujo a escala para determinar este diámetro de manera precisa. Se tiene entonces los parámetros descriptivos del material de lecho mostrados en el cuadro 5.2.1.

Cuadro 5.2.1
Descripción del Material de Lecho

Suelo	d_{50} (mm)	σ_g	d_{95} (mm)
1	1,19	1,25	1,72
2	1,19	2,00	3,73

5.2.2 Velocidad Máxima del Chorro al Ingresar al Lecho Móvil

El chorro de agua fluye sumergido a lo largo del solado de protección produciéndose su difusión y desarrollándose perfiles de velocidad a lo largo del solado, cada uno con un valor máximo de velocidad a cierta altura desde el fondo o lecho. Es de interés conocer el valor de esta velocidad máxima al ingresar el chorro al lecho móvil, es decir, en el extremo final del solado de protección. Para ello se hace uso de una expresión que describe la difusión del chorro de pared a lo largo del solado. Según ha sido indicado, para una longitud de seis veces la abertura de la compuerta la velocidad máxima del chorro no decae aún; pasada tal longitud empieza a decaer de manera similar a la de un chorro libre. La velocidad máxima ha sido entonces estimada según este criterio, verificando que la longitud de solado de la prueba sea mayor a la longitud para la cual la velocidad no decae. En el cuadro 5.2.2 se muestra los resultados obtenidos de la velocidad máxima del chorro al ingreso al lecho móvil; U_{m_0} , y el valor del número de Froude densimétrico correspondiente, F_{95} .

Cuadro 5.2.2
Velocidad Máxima del Chorro al Inicio del Perfil de Erosión

Esquema	Suelo	b (cm)	L (cm)	U _o (m/s)	(b/L) ^{0.5}	U _{mo} (m/s)	L sin difusión	F95
1	1	6.0	40.0	0.278	0.387	0.264	36.0	1.583
2	1	6.0	40.0	0.343	0.387	0.326	36.0	1.951
3	1	5.0	40.0	0.500	0.354	0.433	30.0	2.596
4	1	6.0	40.0	0.417	0.387	0.395	36.0	2.370
5	1	7.0	40.0	0.357	0.418	0.357	42.0	2.140
6	1	8.0	40.0	0.313	0.447	0.313	48.0	1.873
7	1	6.0	40.0	0.489	0.387	0.464	36.0	2.780
8	1	6.0	40.0	0.557	0.387	0.528	36.0	3.167
9	1	7.0	40.0	0.477	0.418	0.477	42.0	2.861
10	1	8.0	40.0	0.418	0.447	0.418	48.0	2.503
11	1	6.0	40.0	0.628	0.387	0.596	36.0	3.570
12	1	6.0	40.0	0.696	0.387	0.660	36.0	3.956
13	1	6.0	60.0	0.278	0.316	0.216	36.0	1.292
14	1	6.0	60.0	0.343	0.316	0.266	36.0	1.593
15	1	6.0	60.0	0.417	0.316	0.323	36.0	1.935
16	1	6.0	60.0	0.483	0.316	0.374	36.0	2.244
17	1	7.0	60.0	0.419	0.342	0.351	42.0	2.102
18	1	6.0	60.0	0.557	0.316	0.431	36.0	2.586
19	1	7.0	60.0	0.477	0.342	0.399	42.0	2.394
20	1	8.0	60.0	0.418	0.365	0.374	48.0	2.240
21	1	6.0	60.0	0.628	0.316	0.486	36.0	2.915
22	1	7.0	60.0	0.538	0.342	0.450	42.0	2.699
23	1	8.0	60.0	0.471	0.365	0.421	48.0	2.524
24	1	6.0	60.0	0.696	0.316	0.539	36.0	3.230
25	1	7.0	60.0	0.596	0.342	0.499	42.0	2.990
26	1	6.0	60.0	0.764	0.316	0.592	36.0	3.547
27	1	7.0	60.0	0.655	0.342	0.548	42.0	3.284
28	1	6.0	60.0	0.343	0.316	0.266	36.0	1.593
29	1	6.0	60.0	0.417	0.316	0.323	36.0	1.935
30	1	6.0	60.0	0.489	0.316	0.379	36.0	2.270
31	1	6.0	60.0	0.557	0.316	0.431	36.0	2.586
32	1	6.0	80.0	0.417	0.274	0.280	36.0	1.676
33	1	7.0	80.0	0.357	0.296	0.259	42.0	1.551
34	1	6.0	80.0	0.489	0.274	0.328	36.0	1.966
35	1	7.0	80.0	0.419	0.296	0.304	42.0	1.820
36	1	6.0	80.0	0.628	0.274	0.421	36.0	2.524
37	2	6.0	40.0	0.417	0.387	0.395	36.0	1.609
38	2	6.0	40.0	0.557	0.387	0.528	36.0	2.151
39	2	7.0	40.0	0.477	0.418	0.477	42.0	1.943
40	2	6.0	40.0	0.696	0.387	0.660	36.0	2.686
41	2	7.0	40.0	0.596	0.418	0.596	42.0	2.426
42	2	8.0	40.0	0.522	0.447	0.522	48.0	2.123

b, abertura de la compuerta

L, longitud del solado

U_o, velocidad de salida del chorro

U_{mo}, velocidad del chorro al inicio del hueco de erosión

F95, número de Froude densimétrico utilizando el diámetro d95 de las partículas de sedimento

5.2.3 Características Geométricas de los Perfiles de Erosión

En las figuras 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, y 5.2.4 se muestra gráficos adimensionales de los perfiles de erosión, tomando la distancia horizontal hasta la cresta de la duna X_D como el factor de escala de las coordenadas X e Y de cada perfil. Los gráficos de las figuras 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3 corresponden al suelo 1 y longitudes de solado de protección de 40 cm, 60 cm y 80 cm, respectivamente. El gráfico de la figura 5.2.4 corresponde al suelo 2 con una longitud de solado de protección de 40 cm. Como ha sido hallado en otros estudios, los perfiles de erosión muestran similitud de forma aproximada para diferentes intervalos de tiempo, con algunas diferencias al comparar los perfiles de erosión adimensionales para las distintas longitudes de solado y los dos tipos de suelo. En realidad, es importante indicar que se ha observado cierta dependencia con la velocidad de salida del chorro, con una mayor profundización de la erosión para velocidades altas. Asimismo, en algunos casos se evidencia dependencia con el intervalo de tiempo puesto que el fenómeno se desarrolla en fases. Aún así, para poder trabajar los resultados y llegar a expresiones simples, se ha adoptado que para un tipo de suelo y longitud de solado determinados, los perfiles de erosión fluctúan alrededor de un promedio. A partir de los perfiles adimensionales así concebidos se ha obtenido relaciones entre sus dimensiones principales: profundidad de erosión máxima s , distancia horizontal hasta la cresta de la duna X_D , y área del perfil de erosión A (incluye zona erosionada y duna). Se obtiene entonces el factor K que relaciona la capacidad de transporte específica q_s con el producto de la profundidad de erosión por su velocidad de cambio. Los factores obtenidos son entonces valores promedio y se muestran en el cuadro 5.2.3 haciendo distinción del tipo de suelo y de la longitud de solado a los cuales corresponden. La diferencia observada para la longitud de solado de 80 cm se considera se debe, en parte, a que con esa longitud se efectuaron pocas pruebas —según ha sido indicado, debido a los efectos tridimensionales que se producían con esta longitud— de modo que no se llega a formar una mayor dispersión de puntos como en los otros casos; sin embargo, es notoria una tendencia a la variación de los factores con el incremento de la longitud del solado. Debe observarse que entre el suelo 1 con longitud de solado 40 cm y el suelo 2 con igual longitud de solado, los factores son prácticamente idénticos.

Figura 5.2.1
Perfil de Erosión Adimensional
Suelo 1 - Longitud de Solado 40 cm

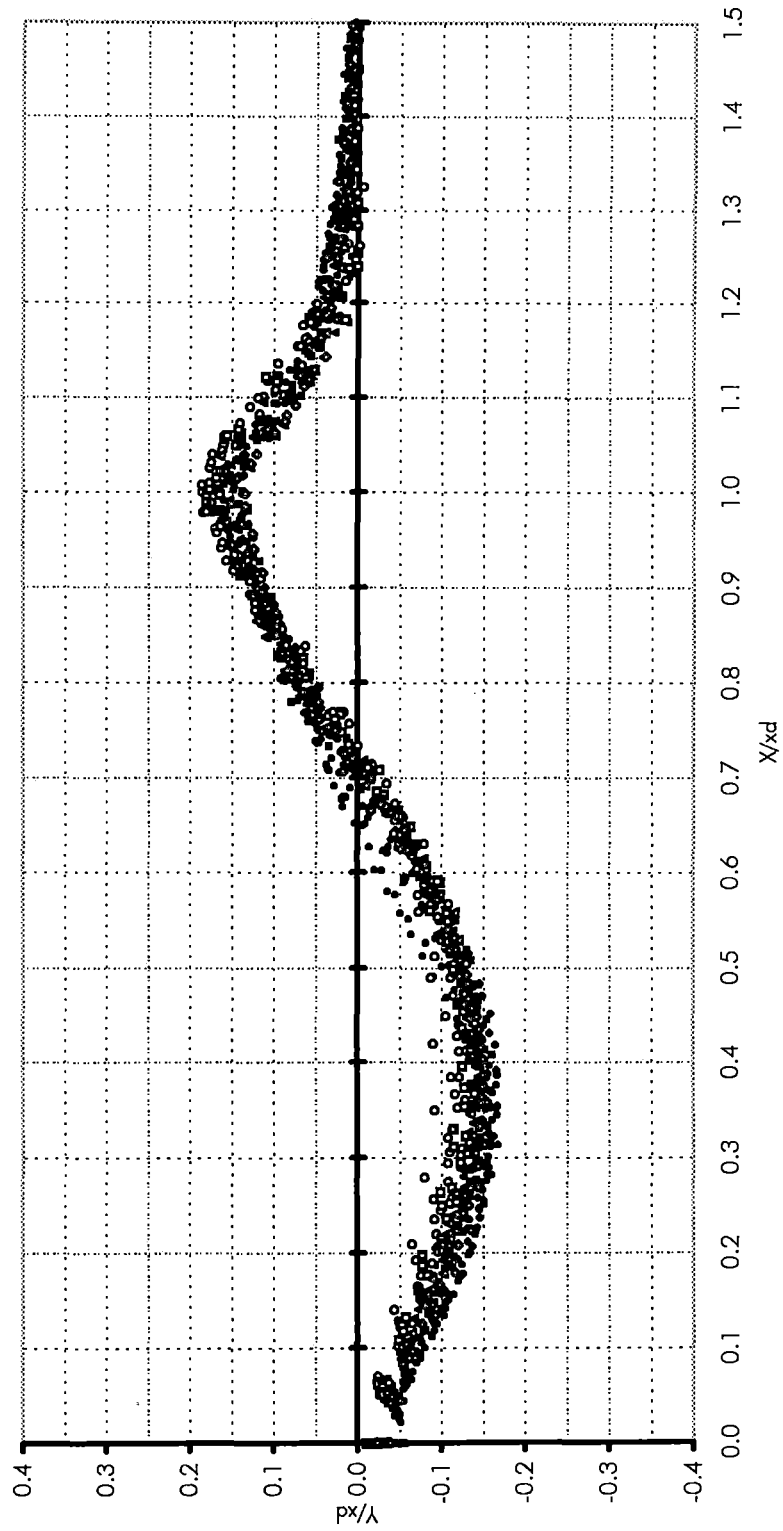


Figura 5.2.2
Perfil de Erosión Adimensional
Suelo 1 - Longitud de Solado 60 cm

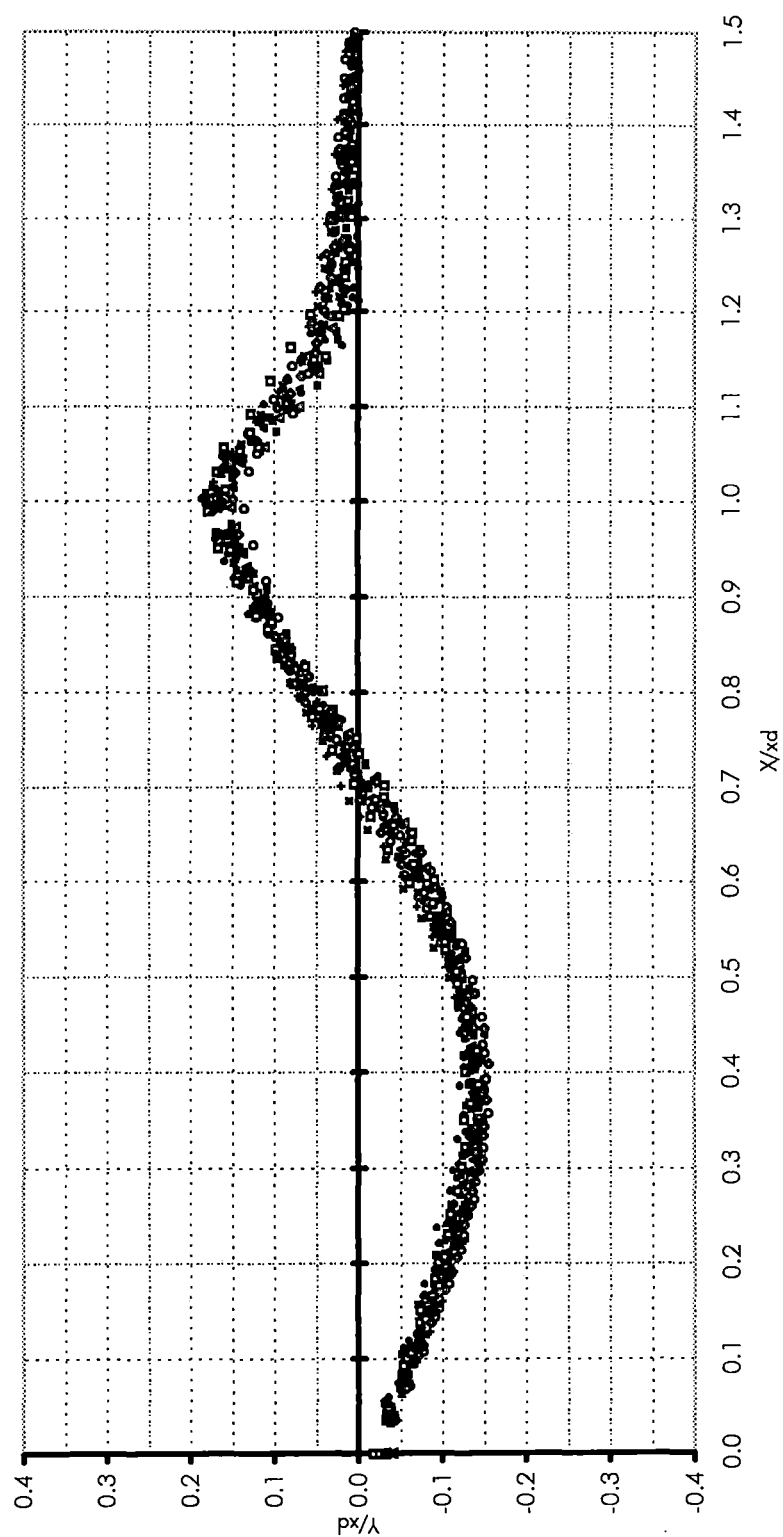


Figura 5.2.3
Perfil de Erosión Adimensional
Suelo 1 - Longitud de Solado 80 cm

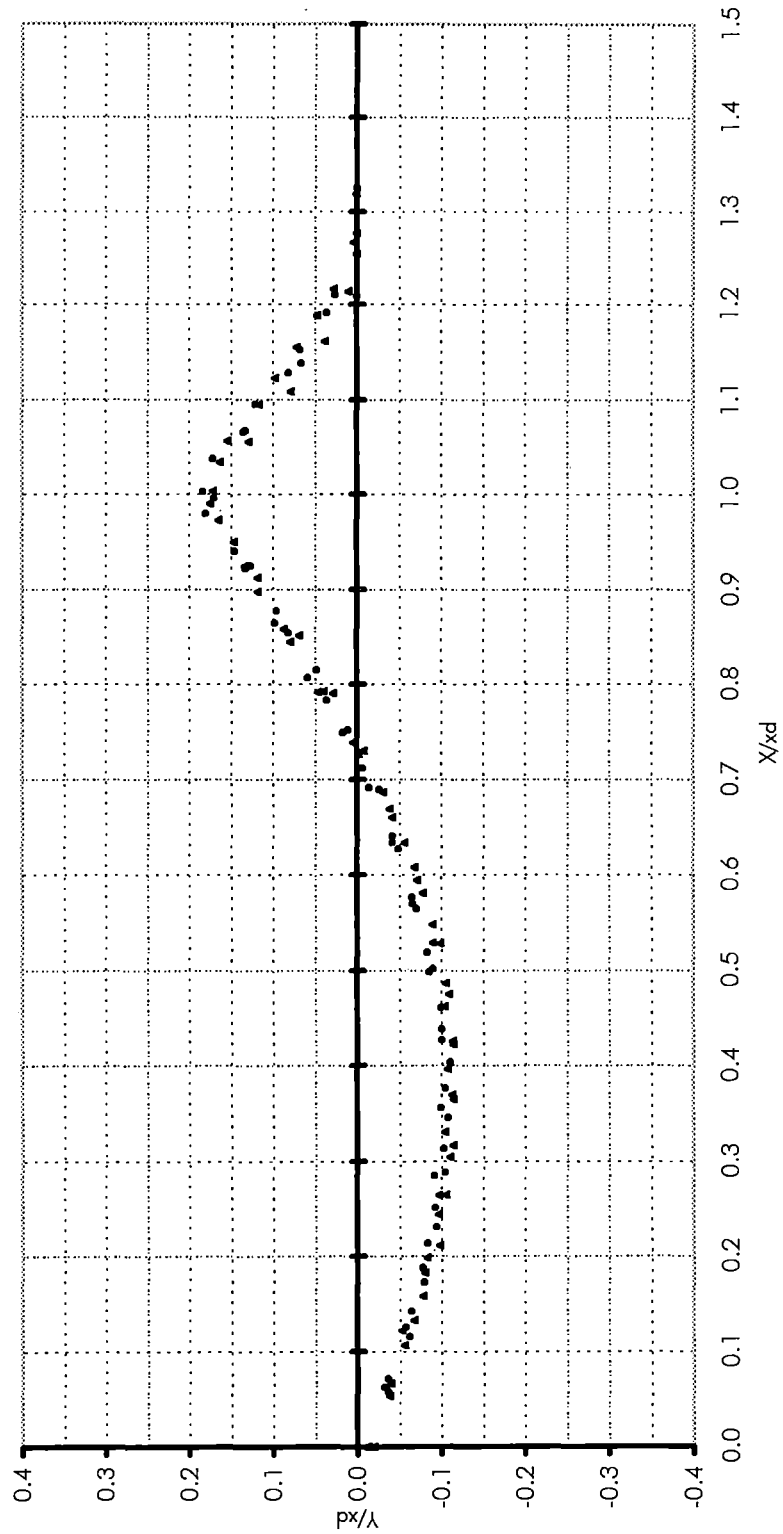
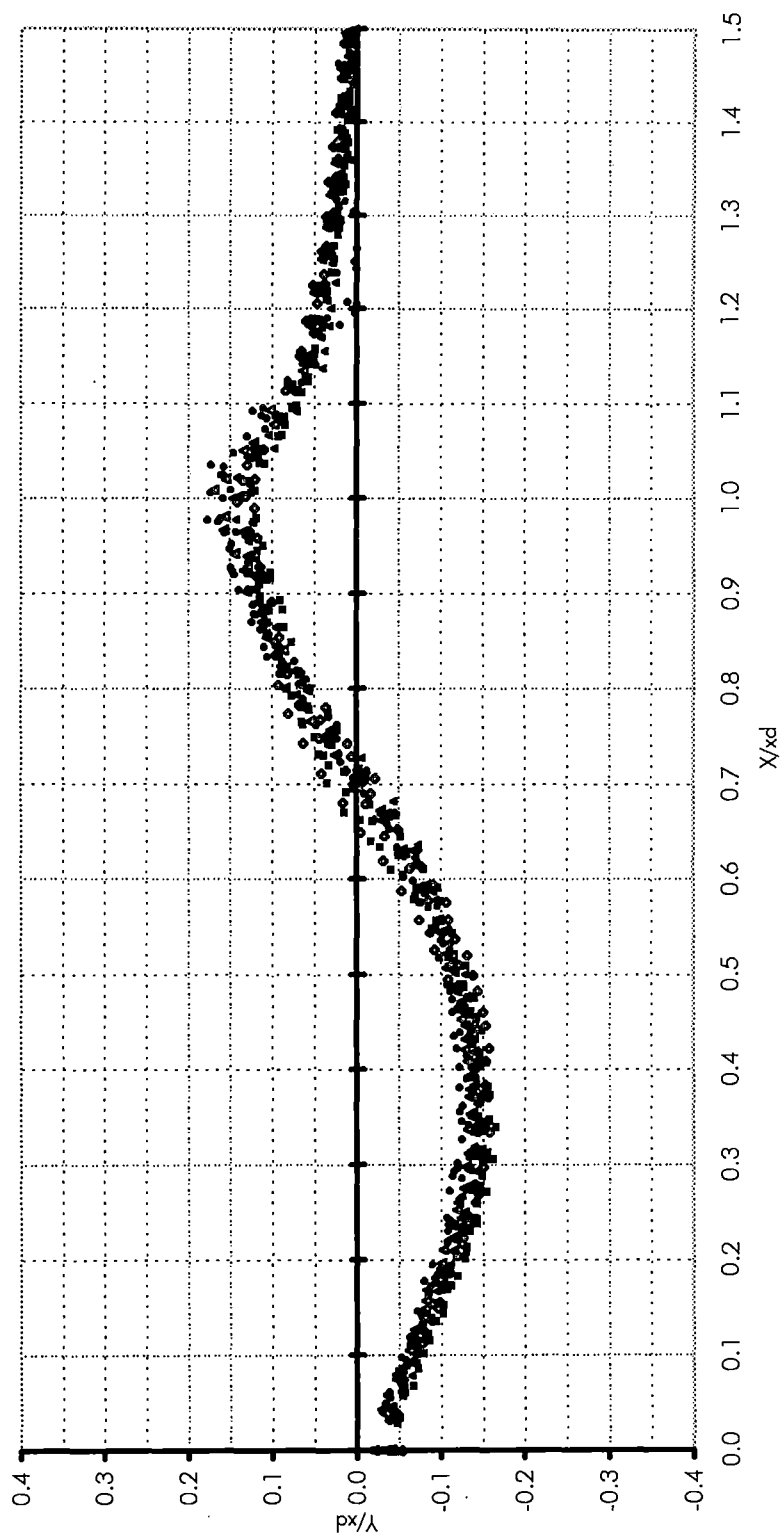


Figura 5.2.4
Perfil de Erosión Adimensional
Suelo 2 - Longitud de Solado 40 cm



Cuadro 5.2.3
Características Geométricas del Perfil de Erosión

Suelo	L (m)	s/X_D	A/X_D^2	A/s^2	K
1	0,40	0,1438	0,1169	5,6554	11,31
	0,60	0,1391	0,1149	5,9341	11,87
	0,80	0,1117	0,1016	8,1497	16,30
2	0,40	0,1438	0,1171	5,6634	11,33

5.2.4 Froude Densimétrico Crítico

Considerando la velocidad de salida del chorro crítica de 0,167 m/s, la cual no disminuye antes de llegar al extremo final del solado pues la abertura de compuerta correspondiente es alta, puede calcularse el número de Froude densimétrico crítico — de iniciación del movimiento. El número de Froude densimétrico crítico es determinado considerando el diámetro d_{95} de cada suelo y un peso específico relativo sumergido de 1,65; resulta entonces 1,0 para el suelo 1 y 0,7 para el suelo 2. Debe recalarse que el número de Froude densimétrico crítico así obtenido es impreciso pues la velocidad de salida del chorro crítica ha sido determinada de manera aproximada, existiendo sobre todo la incertidumbre de haber determinado la iniciación del movimiento bajo un único criterio que sea exacto. Esto se complica por la presencia de varios tamaños de partícula, cada uno de los cuales tendrá una velocidad de iniciación de movimiento distinta. Si bien la determinación del instante en el cual se inicia el movimiento durante las pruebas fue establecida según que se observe un movimiento generalizado del lecho, esto es, hasta la partícula más grande estaba en movimiento; en el caso del suelo 2 no podía darse tal caso pues las partículas más grandes no eran desplazadas; sin embargo, no se podía considerar que no se había iniciado el movimiento pues la erosión estaba en curso debido al desplazamiento de las partículas finas. De otro lado, la iniciación del movimiento se producía de manera rápida de modo que no podía ser establecida como el instante en el cual se desplazaban las partículas más finas. Esta imprecisión podría no tener un efecto importante sobre los resultados pero debe ser indicada.

5.2.5 Variación de la Capacidad de Transporte en el Tiempo

Se ha calculado la capacidad de transporte específica (capacidad de transporte por unidad de ancho) a partir de las mediciones de la variación del perfil de erosión en el tiempo. Según lo expuesto en el análisis teórico, es conveniente expresar la capacidad de transporte en forma adimensional con la forma dada por Carstens. Se efectuó entonces el cálculo de este parámetro adimensional así como el correspondientes a la profundidad de erosión, s/b , para cada una de las pruebas disponibles. Los resultados numéricos no se presentan en forma tabular, en su lugar, en la figura 5.2.5 se presenta un gráfico que relaciona ambos parámetros utilizando los resultados obtenidos para el suelo 1, con distinción de la longitud de solado de protección a la que corresponden.

Se observa que el efecto de la longitud del solado no ha sido del todo absorbida al considerar la difusión del chorro en su recorrido hacia el lecho móvil; sin embargo, a juzgar por la disposición de los puntos en el gráfico, el efecto remanente es pequeño, lo cual se prueba al considerar todos los puntos juntos y hallar un coeficiente de correlación aceptable (0,785) para el ajuste de los datos a una única ecuación de regresión, según se muestra en la figura 5.2.6. Hallada una relación única para los resultados obtenidos con el suelo 1, se adjunta los resultados obtenidos con el suelo 2, tal como se muestra en la figura 5.2.7. Si bien podría también indicarse que hay cierto efecto debido a la diferencia de las características de ambos suelos, nuevamente podemos aceptar que se trata de un efecto pequeño. En la figura 5.2.8 se muestra todos los resultados de manera global y se presenta la ecuación de regresión obtenida, con un coeficiente de correlación de 0,779. Tenemos entonces la siguiente expresión para la capacidad de transporte específica, la cual relaciona los resultados obtenidos en todas las pruebas:

$$\frac{q_s}{(F_{95}^2 - F_{95c}^2)^{5/2} U_{m_0} d_{95}} = 0,00009 \left(\frac{s}{b} \right)^{-2,6899}$$

El término a la izquierda es el parámetro adimensional propuesto por Carstens con las modificaciones de utilizar el número de Froude densimétrico y el diámetro d_{95} .

Figura 5.2.5
Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima
Suelo 1 con Longitudes de Solado Distintas

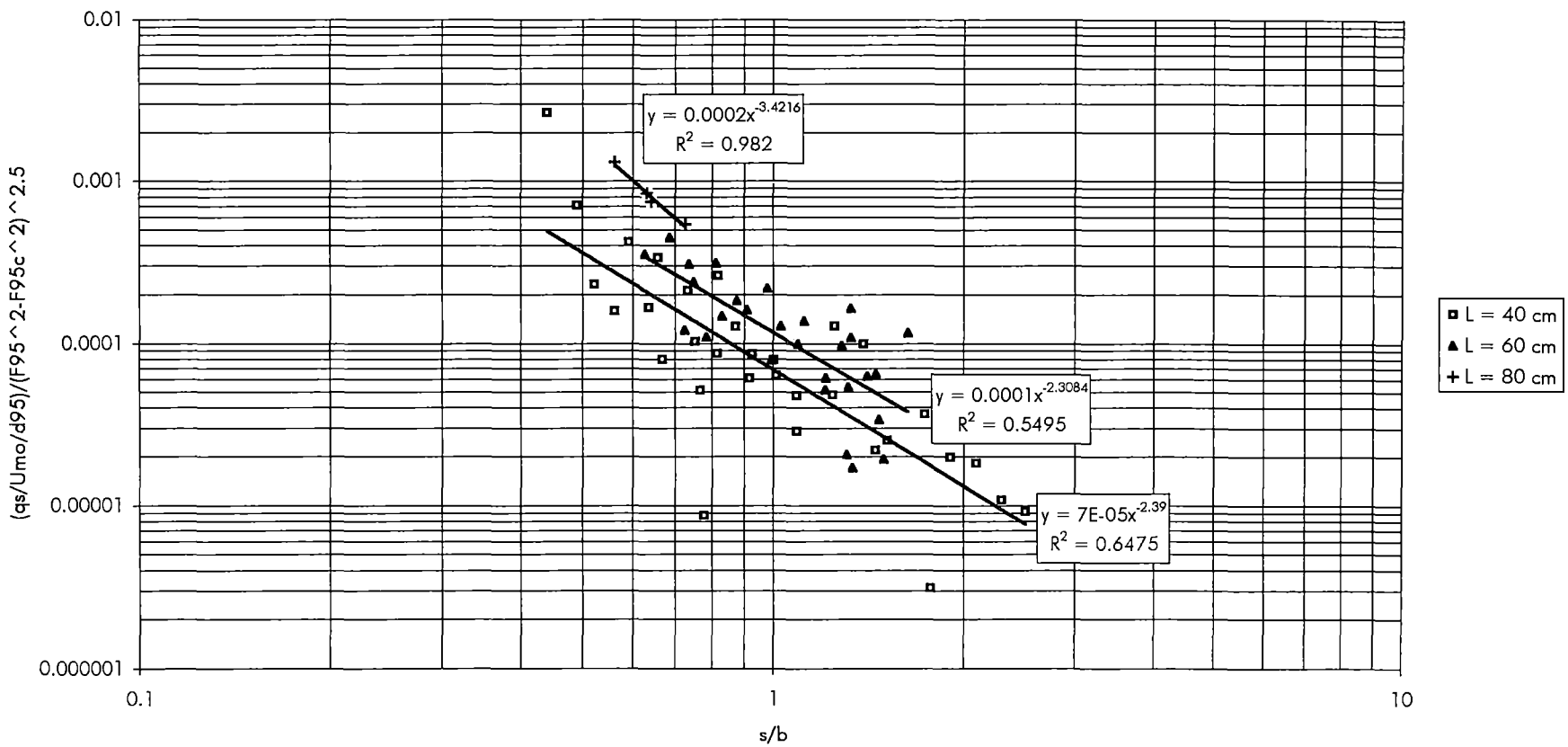


Figura 5.2.6
Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima
Suelo 1

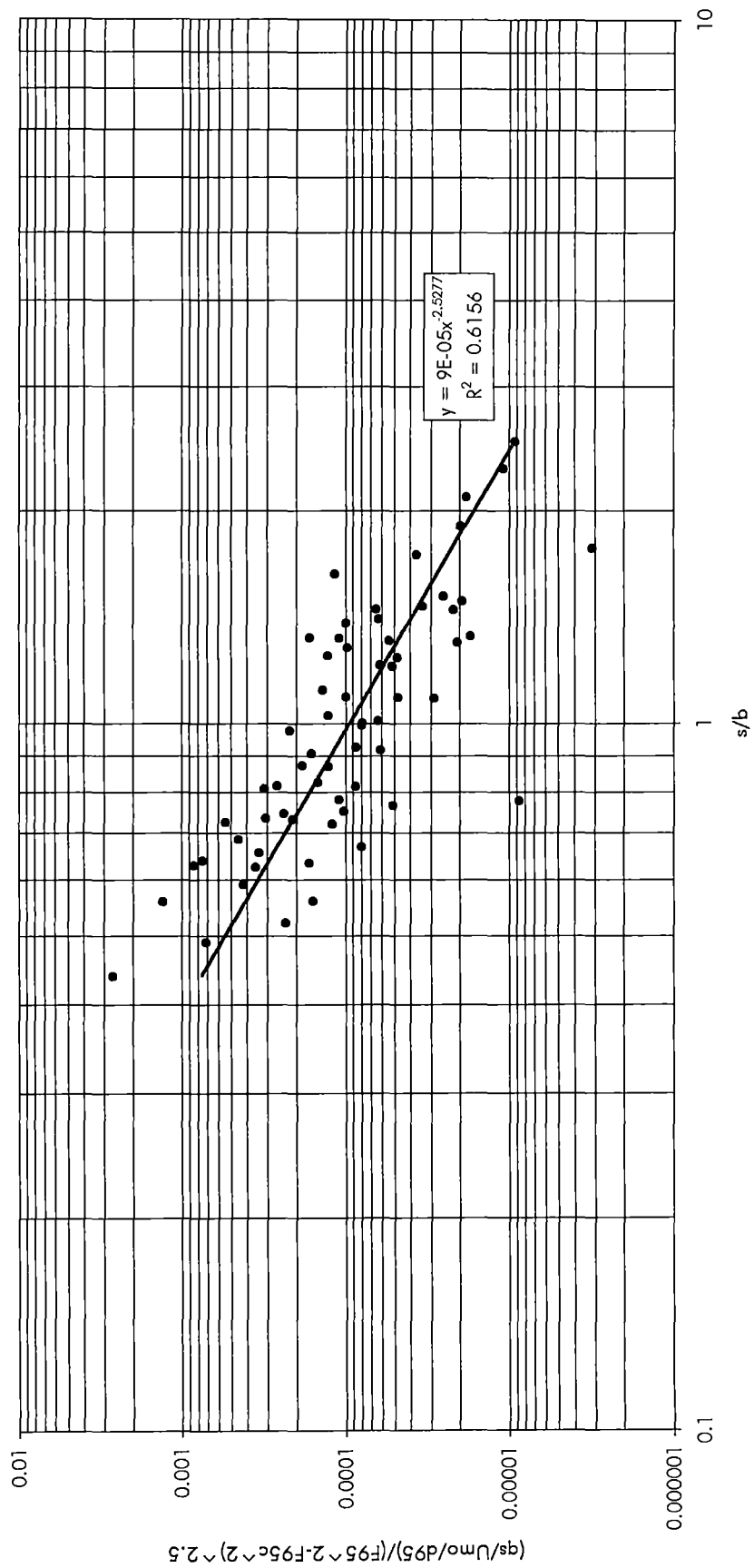


Figura 5.2.7
Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima
Suelos 1 y 2

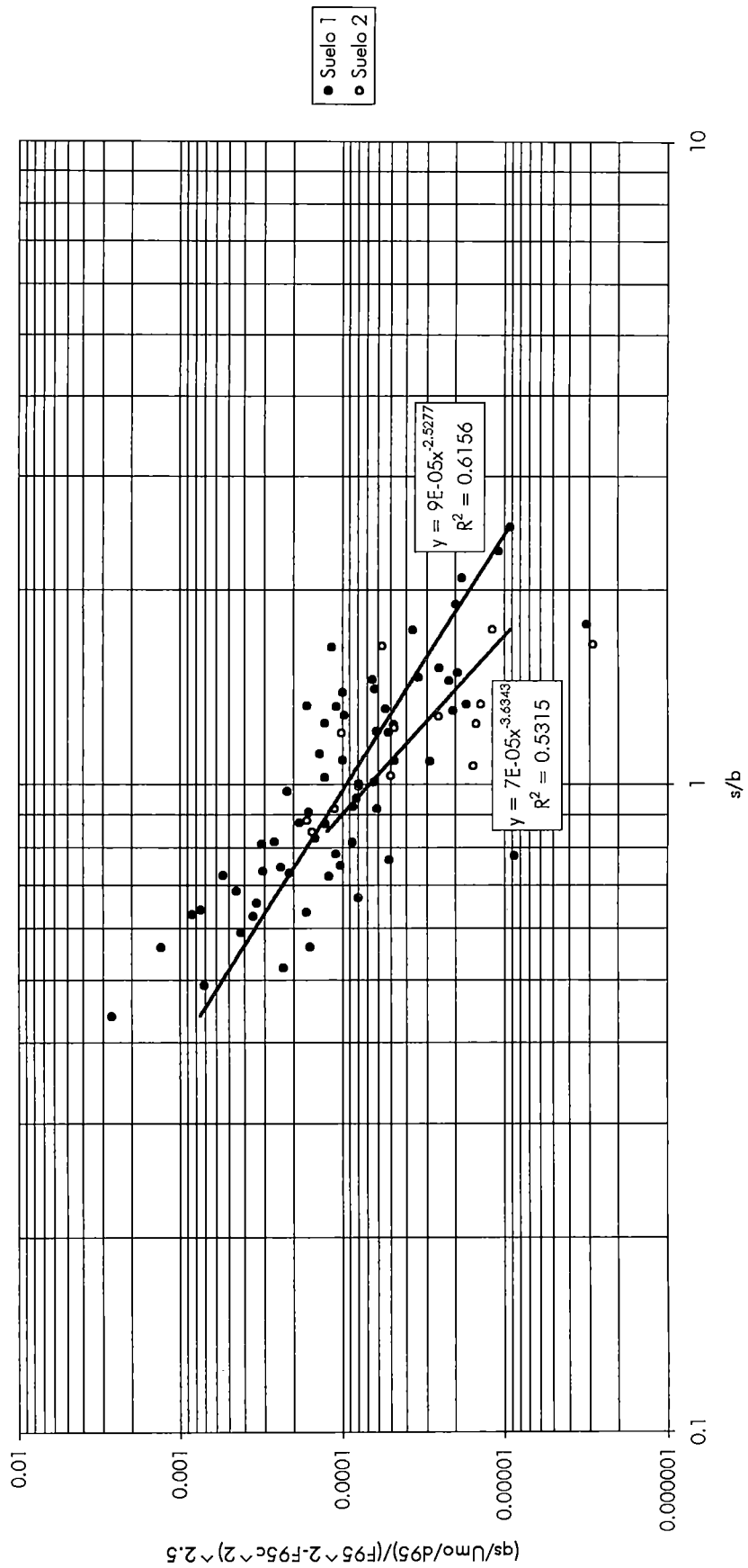
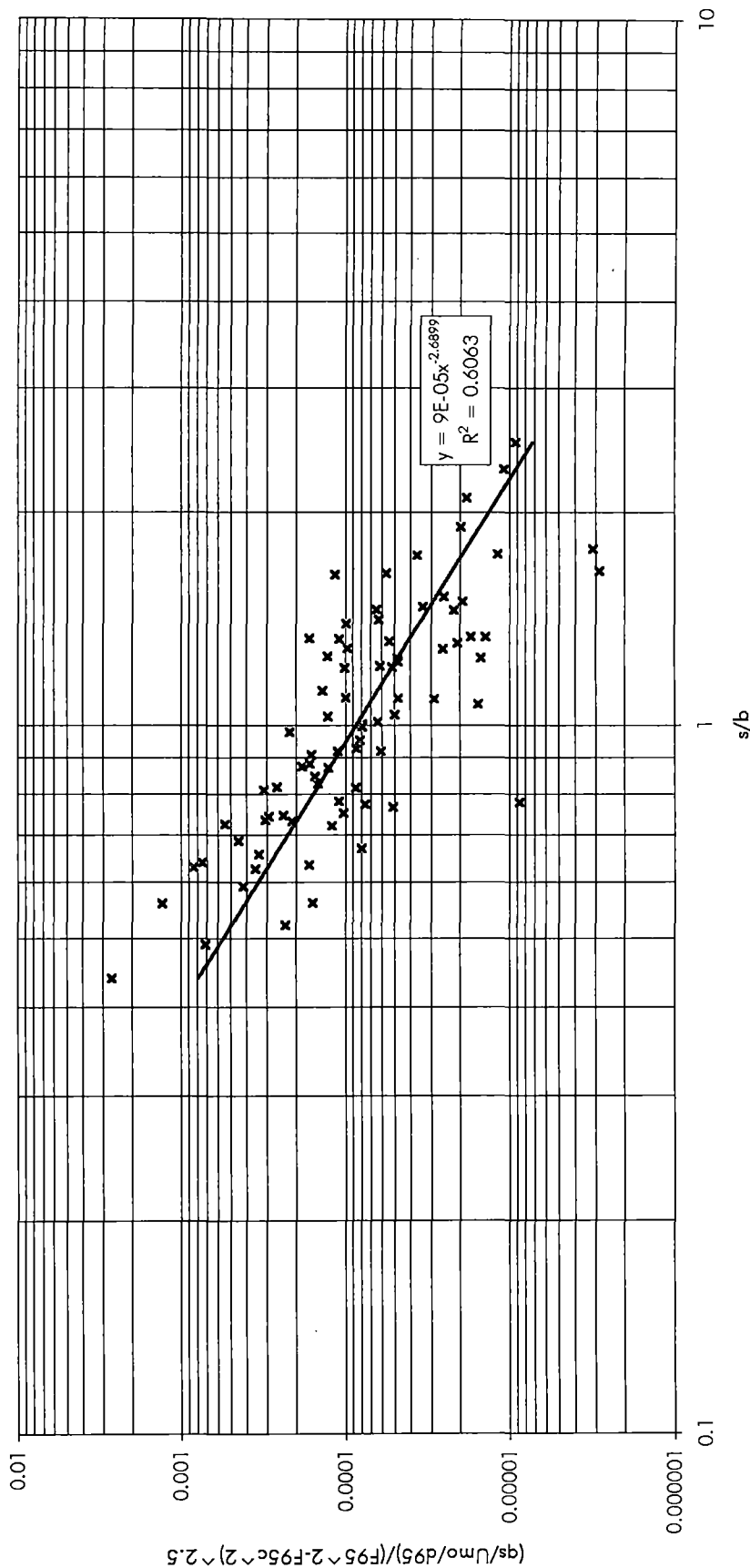


Figura 5.2.8
 Variación del Caudal Sólido con la Profundidad de Erosión Máxima
 Suelos 1 y 2 (sin distinción)



5.2.6 Variación de la Profundidad de Erosión en el Tiempo

A partir de la expresión hallada para la capacidad de transporte específica puede determinarse una expresión para la profundidad máxima de erosión. Si consideramos un valor K promedio que caracterice los perfiles de erosión en los dos tipos de suelo utilizados, la capacidad de transporte específica queda determinada en función de las características geométricas del perfil de erosión según:

$$q_s = 11,32 \left(s \frac{ds}{dt} \right)$$

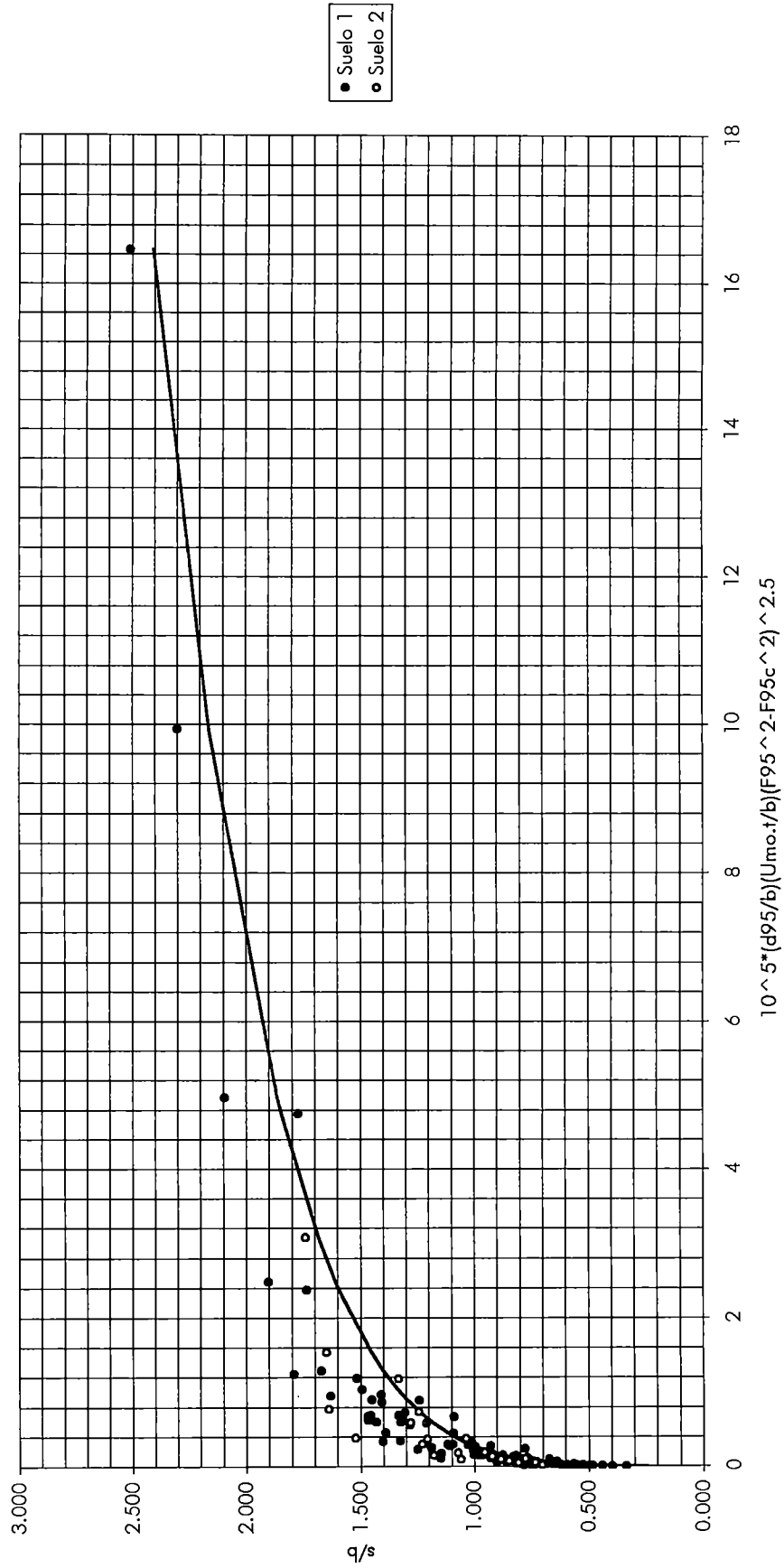
Esta expresión es válida para todas las pruebas realizadas, desestimando las diferencias mencionadas en los perfiles adimensionales debido a la velocidad del chorro, longitud de solado y tipo de suelo. Reemplazando esta ecuación en la ecuación de capacidad de transporte específica deducida anteriormente, efectuando la integración respectiva, y considerando $s = 0$ para $t = 0$, hallamos:

$$\frac{s}{b} = \left(3,729 \cdot 10^{-5} (F_{95}^2 - F_{95c}^2)^{5/2} \left(\frac{d_{95}}{b} \right) \left(\frac{U_{m_0} t}{b} \right) \right)^{0,213}$$

En el gráfico mostrado en la figura 5.2.9 se muestra los puntos obtenidos a partir de los resultados experimentales, distinguidos según el tipo de suelo al que corresponden, y se superpone la ecuación deducida para la variación de la profundidad de erosión en el tiempo. No se observa agrupamiento de datos según el tipo de suelo, es decir, se ha obtenido una expresión general para el caso estudiado que, aunque no muestra un ajuste perfecto, sugiere el cumplimiento de las hipótesis planteadas en el análisis teórico.

Un inconveniente en la expresión deducida es que no puede obtenerse a partir de esta la profundidad de erosión máxima en el equilibrio, mostrando incluso que el equilibrio se alcanza en un tiempo infinito. Asimismo, considera un proceso gradual y ordenado que no siempre se presenta en la realidad. Estudios ya citados indican que el proceso de erosión muestra fases y el equilibrio se alcanza en un tiempo finito.

Figura 5.2.9
Variación de la Profundidad de Erosión Máxima en el Tiempo



5.3 COMENTARIO

La expresión deducida para la variación de la profundidad de erosión en el tiempo corresponde al caso de erosión localizada a la salida de una compuerta y puede extenderse al caso de erosión localizada debida a chorros horizontales sin solado de protección —probablemente con variación de las constantes. Los valores de las constantes no son tan importantes como lo es la forma de la expresión, es decir, los parámetros adimensionales que involucra y la relación hallada entre estos. Efectivamente, puede considerarse que la longitud de solado sólo interviene en la reducción de la velocidad de salida del chorro hasta su ingreso al lecho móvil, y que el ligero efecto adicional observado en el análisis puede deberse a la aparición de efectos tridimensionales al incrementarse la longitud de solado para el ancho de canal utilizado en las pruebas. De otro lado, el suelo no uniforme estaría representado por el diámetro d_{95} sin necesidad de incluir su desviación estándar geométrica como parámetro adicional en comprobación de lo hallado por Aderibigbe y Rajaratnam (1998); sin embargo, debe efectuarse más pruebas para asegurar la validez de esta simplificación en todos los casos. Por último, aceptando la dispersión mostrada en los resultados, es suficiente considerar la velocidad del chorro a su ingreso al lecho móvil y no aquella al interior de la zona erosionada. Aunque es posible que una determinación de la velocidad al interior del perfil de erosión resulte en una mejor descripción de su desarrollo, no se consideró efectuar este tipo de mediciones en las pruebas y los resultados muestran que la simplificación de utilizar la velocidad al ingreso del lecho móvil es aceptable. Debe indicarse que la imprecisión en el número de Froude densimétrico crítico ha tenido un efecto que no se hace apreciable o significativo en los resultados, razón probable de que en investigaciones recientes se considere sólo el número de Froude densimétrico del chorro que produce la erosión y no su valor crítico. Asimismo, se considera que la altura de sumergimiento aguas abajo sí tiene un efecto en las pruebas efectuadas lo cual puede ser causa adicional de la dispersión de los datos; sin embargo, no se analiza este factor pues no se hicieron suficientes pruebas con variación de esta altura de sumergimiento y no fue considerada en el análisis teórico. Analizando las pocas pruebas efectuadas con variación de la altura de sumergimiento se observa lo siguiente: manteniendo las otras variables constantes, para una menor altura de sumergimiento se produce una menor profundidad máxima de erosión.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos permiten concluir lo siguiente:

1. El material de lecho móvil erosionado no tiene efecto sobre la velocidad de salida del chorro. Esta sólo depende del caudal de flujo, el ancho del canal y la abertura de compuerta, y produce una carga de agua (diferencia de nivel entre el nivel aguas arriba de la compuerta y el nivel de sumergimiento) que guarda una relación única con la velocidad independientemente del valor que tomen las otras variables consideradas en el fenómeno.
2. A lo largo del solado de protección se produce una difusión del chorro sumergido. Esta difusión se produce en forma similar a la de un chorro libre de modo que para longitudes de solado inferiores a seis veces la abertura de compuerta la velocidad sigue siendo la misma que a la salida del chorro, pero para longitudes de solado mayores, esta velocidad sufre una disminución proporcional a la relación entre la abertura de compuerta y la longitud sobre el solado. Entonces, la velocidad del chorro puede variar hasta llegar al extremo final del solado (inicio del lecho móvil). Las pruebas muestran que esta es prácticamente la única manera en que interviene la longitud de solado en el proceso de erosión; es decir, hallando la velocidad máxima del chorro en el perfil de velocidad de la sección de ingreso al lecho móvil,

nuestro problema se reduce al de la erosión localizada producida por un chorro horizontal sumergido. Sin embargo, debe mencionarse que se ha observado en las pruebas que para el ancho de canal de 60 cm considerado, y las longitudes de solado estudiadas, a mayor longitud de solado se producen mayores efectos tridimensionales, al parecer debido a que el flujo divaga sobre el solado amplio; este efecto adicional de la longitud de solado ha tratado de mantenerse mínimo durante las pruebas de modo que no ha sido apreciablemente importante en el estudio, pero su mención es necesaria para la ejecución de futuros estudios en modelo y diseños.

3. El perfil de erosión se desarrolla de manera gradual y ordenada *hasta cierto instante*. Al profundizarse la zona erosionada —con el consiguiente crecimiento de la duna— las partículas de sedimento puestas en movimiento por el chorro de agua no alcanzan a salir de esta zona, no superan a la duna, y se van depositando sobre el talud aguas arriba de la duna formando una giba. En determinado momento esta giba no puede sostenerse más y se desploma sobre la zona erosionada. Durante las pruebas no se prolongaron las mediciones más allá de este instante pues, aunque no se consideró que esta sería la condición límite o de equilibrio, no se estimó posible efectuar pruebas con duración mayor a cuatro horas. En estudios recientes sí se ha continuado con el proceso más allá de este instante hallándose que luego del desmoronamiento de la duna se produce una erosión intensa y desordenada que finalmente vuelve a la fase de erosión gradual y ordenada, sucediéndose estas dos fases hasta alcanzar el equilibrio en un tiempo bastante largo (dos a cuatro días en condiciones de flujo similares a las de la presente investigación).
4. Los perfiles de erosión muestran similitud de forma *aproximada*. En general, puede aceptarse tal similitud de forma pues la consideración de una única dimensión como característica del perfil de erosión simplifica apreciablemente el análisis del fenómeno; sin embargo, debe indicarse que la forma del perfil guarda relación con la velocidad de salida del chorro, el tiempo y la longitud de solado, observándose poca influencia del tipo de suelo en las pruebas efectuadas.

5. Se confirma, aunque se sugiere efectuar estudios adicionales, que desde el punto de vista de la erosión local, el suelo no uniforme puede ser representado únicamente por su diámetro d_{95} sin necesidad de considerar adicionalmente la desviación estándar geométrica de los diámetros de sedimento (índice de la no uniformidad de la mezcla de sedimentos). Es decir, un suelo no uniforme con diámetro medio d_{50} y desviación estándar geométrica σ_g , es equivalente, desde el punto de vista de la erosión local, a un suelo uniforme de diámetro medio d_{95} . Según esto, un suelo puede modificar significativamente su resistencia a la erosión con sólo modificar su gradación a fin de incluir diámetros mayores —y menores— sin necesidad de que toda la mezcla de sedimentos tenga un diámetro uniforme igual al diámetro mayor. El estudio del efecto de la no uniformidad de los sedimentos es de gran importancia puesto que las mezclas de sedimento usualmente presentes en la naturaleza son no uniformes.
6. El número de Froude densimétrico es un parámetro fundamental en el estudio de la erosión local. En el caso de la erosión localizada a la salida de una compuerta, este debe ser evaluado en función de la velocidad de ingreso al lecho móvil y del diámetro d_{95} de las partículas de sedimento que componen este lecho móvil. Estudios en los que se ha alcanzado la condición límite o de equilibrio, señalan que la erosión local terminal es sólo función del número de Froude densimétrico y , en el caso de erosión producida por un chorro de agua horizontal, de la abertura de la compuerta o ranura. Ello permite señalar al número de Froude densimétrico como el criterio de similitud a adoptar en los estudios de erosión localizada, especialmente si se está interesado en la erosión terminal.
7. Aunque los resultados no ponen de manifiesto el no haber considerado el tirante de sumergimiento como variable principal, al analizar las pocas pruebas que se hicieron con un tirante sumergimiento menor se observa que para las mismas condiciones (valores de las otras variables) la profundidad máxima de erosión es también menor. Se considera que esto se debe a que con un tirante de sumergimiento bajo, la duna representa una mayor barrera

que desacelera el flujo, es decir, esto tiene un efecto sobre la velocidad del chorro al ingreso al lecho móvil. Si el efecto del tirante de sumergimiento es sólo el de disminuir la velocidad del chorro, entonces sólo habría que hallar la forma en que esto se produce —al igual que en el caso de la longitud de solado— y se podría obtener entonces una expresión similar a la hallada hasta el momento.

6.2 RECOMENDACIONES

Se presentan algunas recomendaciones que pueden ser útiles para quienes desean llevar a cabo un estudio en modelo hidráulico relacionado al tema:

1. La principal recomendación es la de efectuar un análisis teórico previo a la ejecución de las pruebas. Debe saberse qué se está buscando y la búsqueda debe estar basada en un conocimiento en lo posible cabal del fenómeno.
2. La investigación tiene sus procedimientos; la hidráulica experimental tiene bases teóricas sólidas que deben ser conocidas antes de iniciar un estudio experimental en modelo hidráulico.
3. Los estudios realizados por otros investigadores en el mundo se tienen ahora disponibles casi sin limitación. Debe recopilarse la mayor información disponible pues cada pequeño aporte será de utilidad para el estudio que se emprende.
4. Debe evaluarse la posibilidad de adquirir o ingeniar instrumentos de medición que permitan efectuar las mediciones en menor tiempo y con mayor precisión.
5. Los resultados experimentales deben ser procesados en forma paralela a su medición; ello permitirá reducir el número de pruebas para llegar a una solución o repetir pruebas de ser necesario.

6. Si bien en el procesamiento de los resultados experimentales podría jugarse con estos a fin de hallar expresiones con un ajuste casi perfecto, esto no es lo deseable, a menos que se de sustento físico a tales expresiones.
7. Debe evaluarse la utilidad de la investigación a efectuarse teniendo en consideración que justifique su costo y demanda de trabajo. Existen ciertos problemas frecuentes en el diseño de algunas obras hidráulicas que quizás debieran tener prioridad sobre otros temas de investigación. Tal es el caso de las obras de protección en pilares y estribos de puentes, espigones, ingreso de sedimentos en las obras de toma, etc.
8. Para ahorrar recursos debe evaluarse la posibilidad de reciclar modelos existentes en desuso o utilizar los canales de observación permanentes del laboratorio.
9. Es recomendable utilizar un canal de poco ancho para el estudio del flujo bidimensional o, en todo caso, velocidades altas para evitar efectos tridimensionales debido a la divagación del flujo, sobre todo si se trata de flujo sumergido.
10. Si las condiciones de laboratorio lo permiten, en el estudio de la erosión local debe buscarse prolongar las pruebas a varias horas, por lo menos ocho horas, a fin de observar una mayor variación de la profundidad de erosión en el tiempo o, de ser posible, alcanzar la condición de equilibrio.
11. El Laboratorio Nacional de Hidráulica es un centro de investigación potencial: los temas para investigar abundan, su personal es calificado, y los futuros investigadores son prometedores. Las condiciones ideales faltantes son una instrumentación moderna y una biblioteca actualizada orientados a devolver a nuestro laboratorio el liderazgo que un día tuvo en Latinoamérica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aderibigbe, O. y Rajaratnam, N. (1998). "Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(10), 1034-1042.
2. Breusers, H. N. C. y Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*. IAHR – Hydraulic Structures Design Manual. A. A. Balkema, Rotterdam, Holanda.
3. Carstens, M. R. (1966). "Similarity laws for localized scour." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92(3), 13-36.
4. Chatterjee, S. S. y Ghosh, S. N. (1980). "Submerged horizontal jet over erodible bed." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 106(11), 1765-1782.
5. Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N. y Chatterjee, M. (1994). "Local scour due to submerged horizontal jet." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 120(8), 973-992.
6. Hassan, N. M. K. y Narayanan, R. (1985). "Local scour downstream of an apron." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 111(11), 1371-1385.
7. Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. 1ra Ed., The Macmillan Company, Nueva York, E.E.U.U.
8. Karim, O. A. y Ali, K. H. M. (2000). "Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 38 (4), 279-287.
9. Kurniawan, A., Altinakar, M. S. y Graf, W. H. (2001). "Flow pattern of an eroding jet." 29th IAHR Congress Proceedings, Beijing, China.
10. Langhaar, H. L. (1964). *Dimensional analysis and theory of models*. 6ta Ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, E.E.U.U.
11. Laursen, E.M. (1952). "Observations on the nature of scour." *State University of Iowa Bulletins*, 34, 179-197.
12. Novak, P. y Cábalka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering –physical principles and design applications*. Pitman Advanced Publishing Books, Boston, Londres.
13. Potter, M. y Wiggert, D. (1998). *Mecánica de fluidos*. Traducción autorizada de la 2da Ed., Prentice Hall, México.
14. Prandtl, L. (1952). *Essentials of fluid dynamics*. Traducción autorizada de la 3ra Ed., Blackie & Son, Ltd., Londres.
15. Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. 1ra Ed., Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
16. Rocha, A. (1987). "Modelos hidráulicos: realidad y fantasía." *Revista El Ingeniero Civil*, 50, 25-30.
17. Rouse, H. (1965). *Advanced mechanics of fluids*. 3ra Ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, E.E.U.U.
18. Rouse, H. (1940). "Criteria for similarity in the transportation of sediment." *State University of Iowa Bulletins*, 20, 33-49.
19. Rouse, H. (1950). *Engineering hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa, Iowa, E.E.U.U.
20. Tsuchiya, Y. e Iwagaki, Y. (1967). "On the mechanism of the local scour from flows downstream of an outlet." 12th IAHR Congress Proceedings, Vol. 3, Fort Collins, Colorado, E.E.U.U.

Anexo A

MÉTODO DE BUCKINGHAM

TEOREMA π

MÉTODO DE BUCKINGHAM (TEOREMA π).

Fuente: Novak, P. y Cábalka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering –physical principles and design applications*. Pitman Advanced Publishing Books, Boston, Londres.

Mediante este método se transforma una relación que describe el problema investigado en términos de varias variables, en otra relación más simple entre un menor número de parámetros adimensionales que se establecen a partir de las variables que participan en el problema. Así, si se tiene una función de n variables $f(a, b, c, \dots, n) = 0$, y se cuenta con r magnitudes básicas como lo son la masa M , la longitud L , el tiempo T , etc., se puede entonces establecer una función de $(n-r)$ parámetros adimensionales $F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$, cuya investigación es mucho más simple pues la reducción del número de variables en r también reduce el número de experimentos necesarios para la solución experimental del problema.

Los parámetros adimensionales son productos de varias potencias de las variables que participan en el problema, debiendo haber $(r+1)$ de estas variables en cada uno de ellos. Para la elección de las r variables que aparecerán en todo parámetro adimensional deben cumplirse dos condiciones: estas variables repetitivas deben juntas incluir todas las dimensiones básicas (L , M , T , etc.) y el producto de la primera potencia de estas no debe formar un parámetro adimensional. La variable restante diferirá en cada parámetro (con exponente ± 1) para que en la solución intervengan las n variables que influyen el problema.

Si las dimensiones de las variables que participan en el problema contenidas en cada parámetro adimensional son expresadas mediante las dimensiones básicas podemos sumar los exponentes de la misma dimensión básica para cada parámetro adimensional, esta suma debe ser igual a cero pues el producto de las varias potencias de la dimensión tomada en cuenta es igual a la unidad. Obtenemos entonces r ecuaciones para los r exponentes desconocidos de cada parámetro adimensional. De este modo sus expresiones pueden ser determinadas y se puede proceder a la solución experimental del problema.

Ejemplo

En la resistencia de un cuerpo que se mueve con velocidad constante sobre una superficie infinita de un líquido ideal (no viscoso) con profundidad también infinita, intervienen las siguientes variables: resistencia P , velocidad v , aceleración de la gravedad g , densidad del líquido ρ y una dimensión básica del cuerpo, l . Son cinco variables ($n=5$). Sus dimensiones pueden ser expresadas mediante tres dimensiones básicas (M , L , T) de modo que pueden formarse dos parámetros adimensionales.

$$\pi_1 = l^{x_1} v^{y_1} \rho^{z_1} g^1$$

$$\pi_2 = l^{x_2} v^{y_2} \rho^{z_2} g^1$$

Si se expresan las variables en términos de las dimensiones básicas L , M , T , y se adicionan los exponentes de la misma dimensión básica se puede definir los dos parámetros adimensionales.

Para el primer parámetro adimensional:

$$\pi_1 = L^{x_1} \left(\frac{L}{T} \right)^{y_1} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{z_1} \left(\frac{L}{T^2} \right)^1$$

$$L: \quad x_1 + y_1 - 3z_1 + 1 = 0$$

$$T: \quad -y_1 - 2 = 0$$

$$M: \quad z_1 = 0$$

$$\text{Entonces: } x_1 = 1, y_1 = -2, z_1 = 0$$

$$\pi_1 = \frac{gl}{v^2}$$

Para el segundo parámetro adimensional:

$$\pi_2 = L^{x_2} \left(\frac{L}{T} \right)^{y_2} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{z_2} \left(\frac{ML}{T^2} \right)^1$$

$$L: \quad x_2 + y_2 - 3z_2 + 1 = 0$$

$$T: \quad -y_2 - 2 = 0$$

$$M: \quad z_2 + 1 = 0$$

$$\text{Entonces: } x_2 = -2, y_2 = -2, z_2 = -1$$

$$\pi_2 = \frac{P}{l^2 v^2 \rho}$$

Se obtiene entonces una función de la forma:

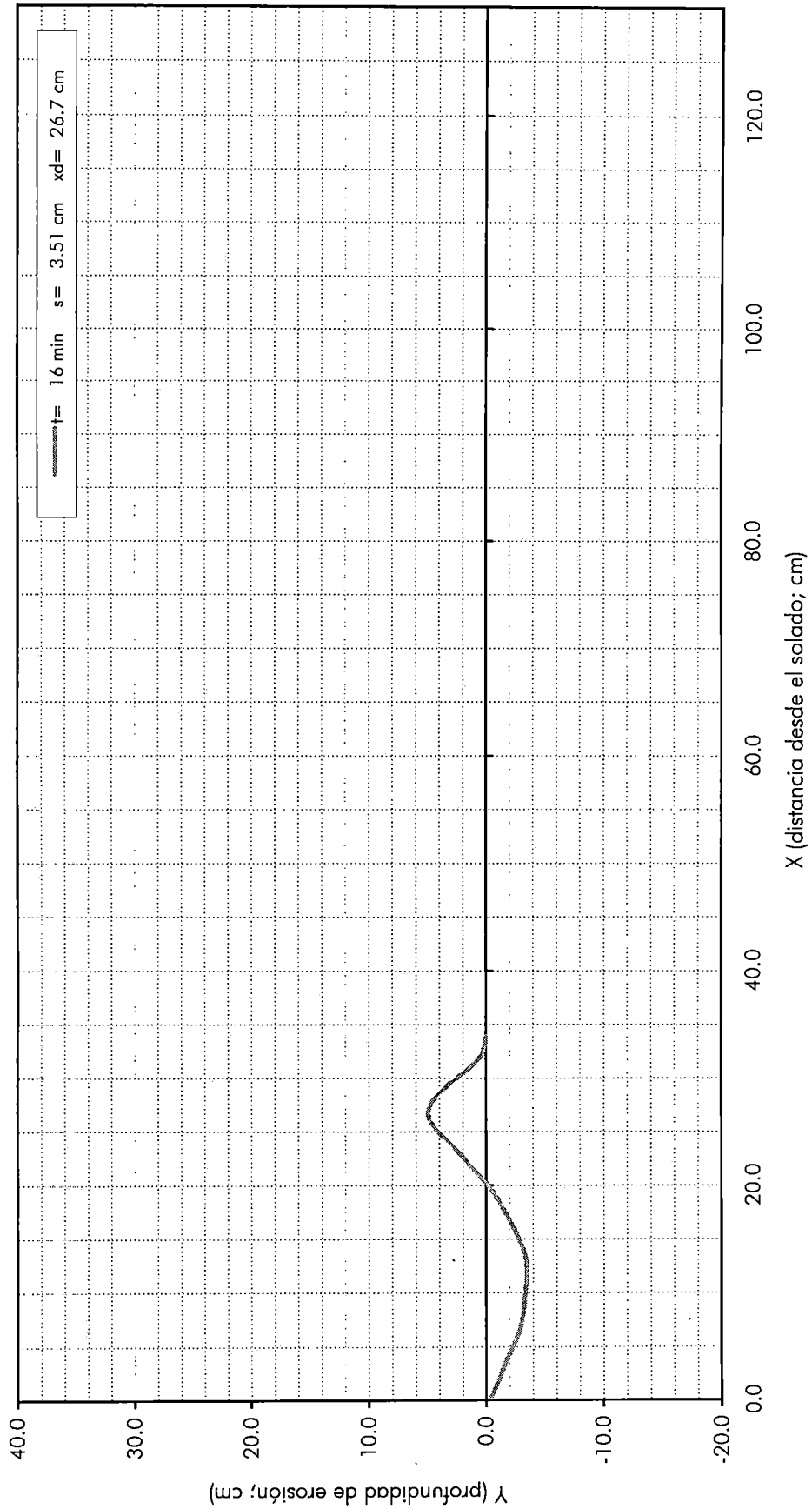
$$F\left(\frac{P}{l^2 v^2 \rho}, \frac{gl}{v^2}\right) = 0$$

Los dos parámetros adimensionales son el número de Newton y el número de Froude, y su relación puede ser hallada experimentalmente.

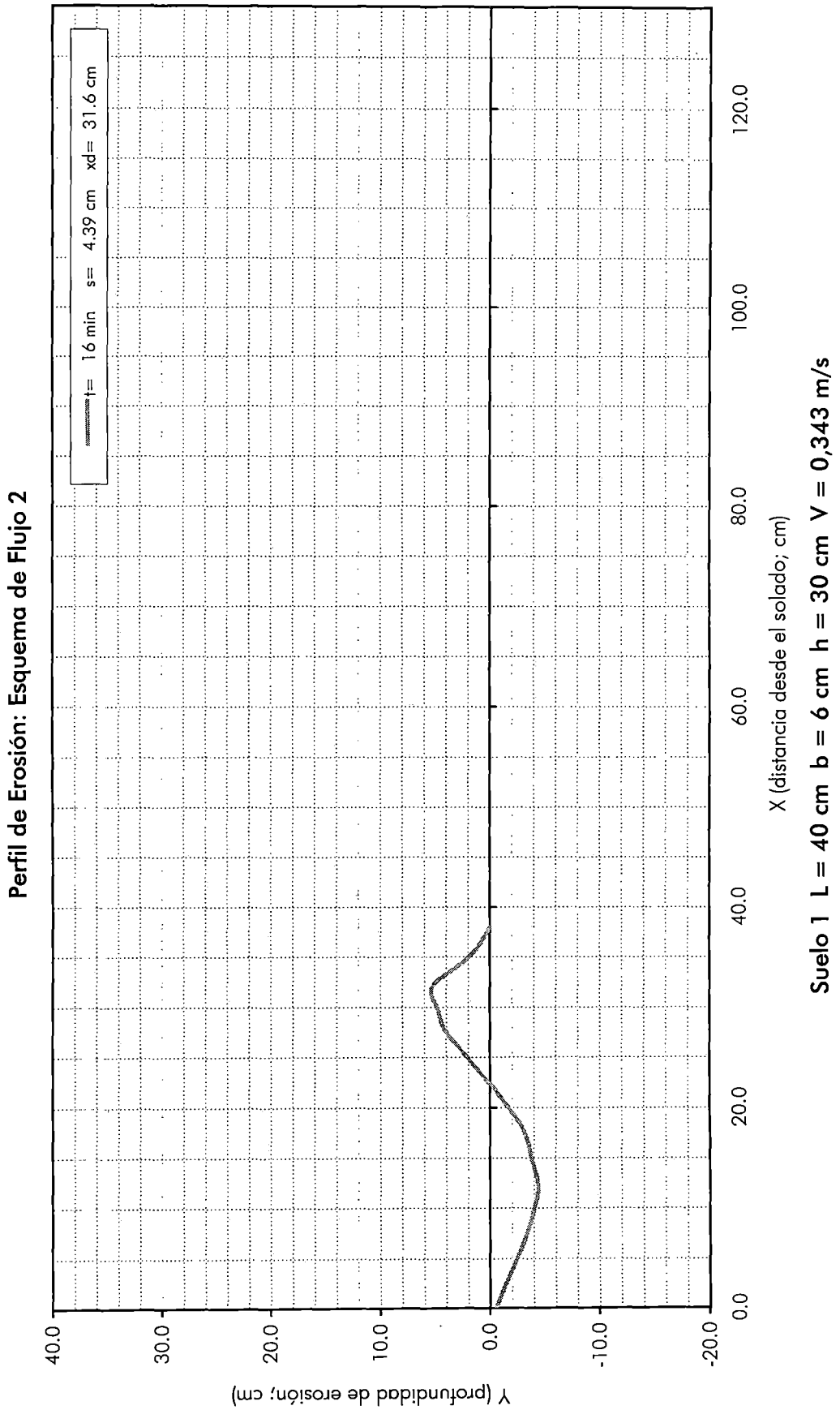
Anexo B

**PERFILES DE EROSIÓN
OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS
(42 Esquemas de Flujo)**

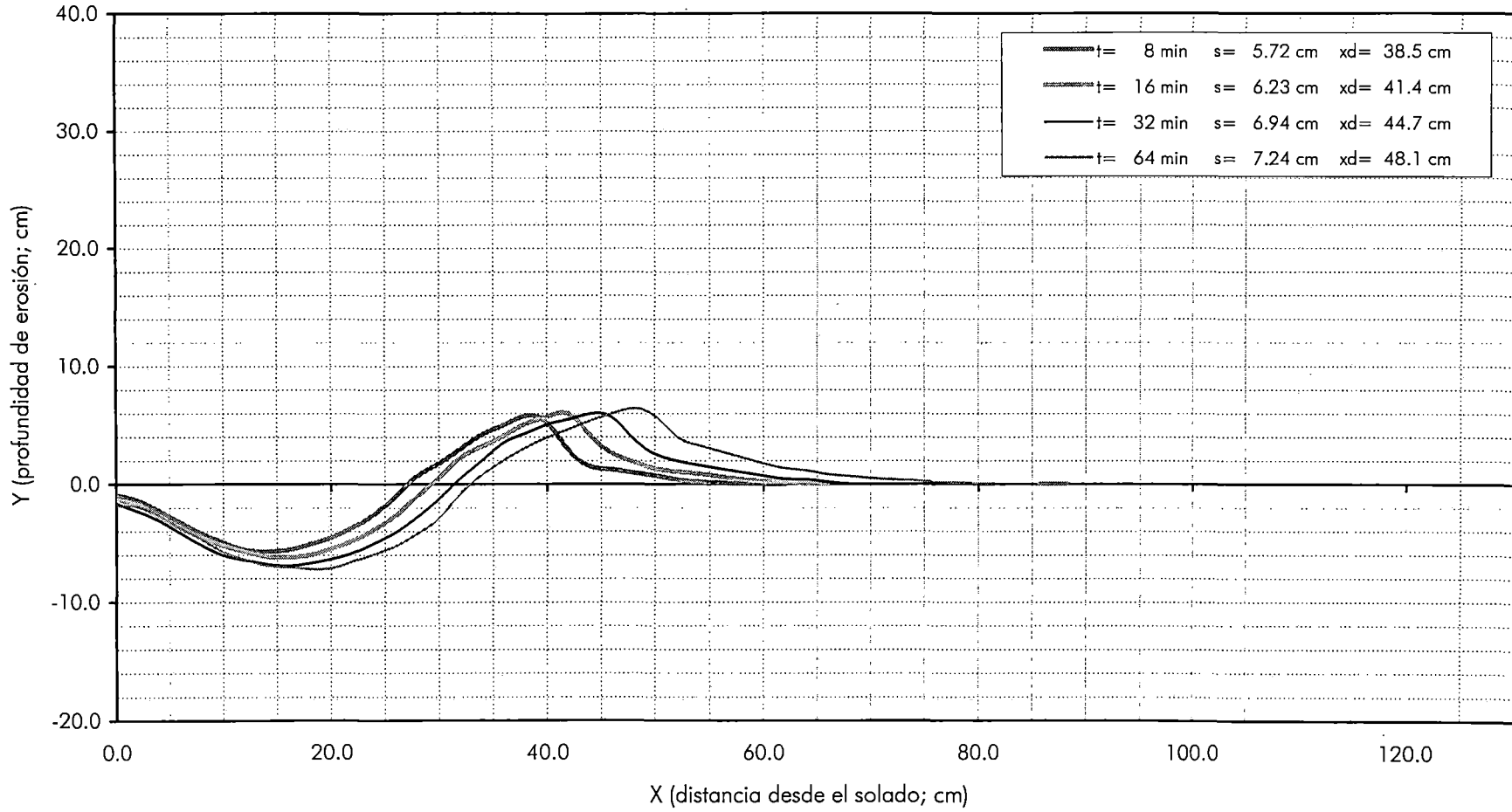
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 1



Suelo 1 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,278 m/s

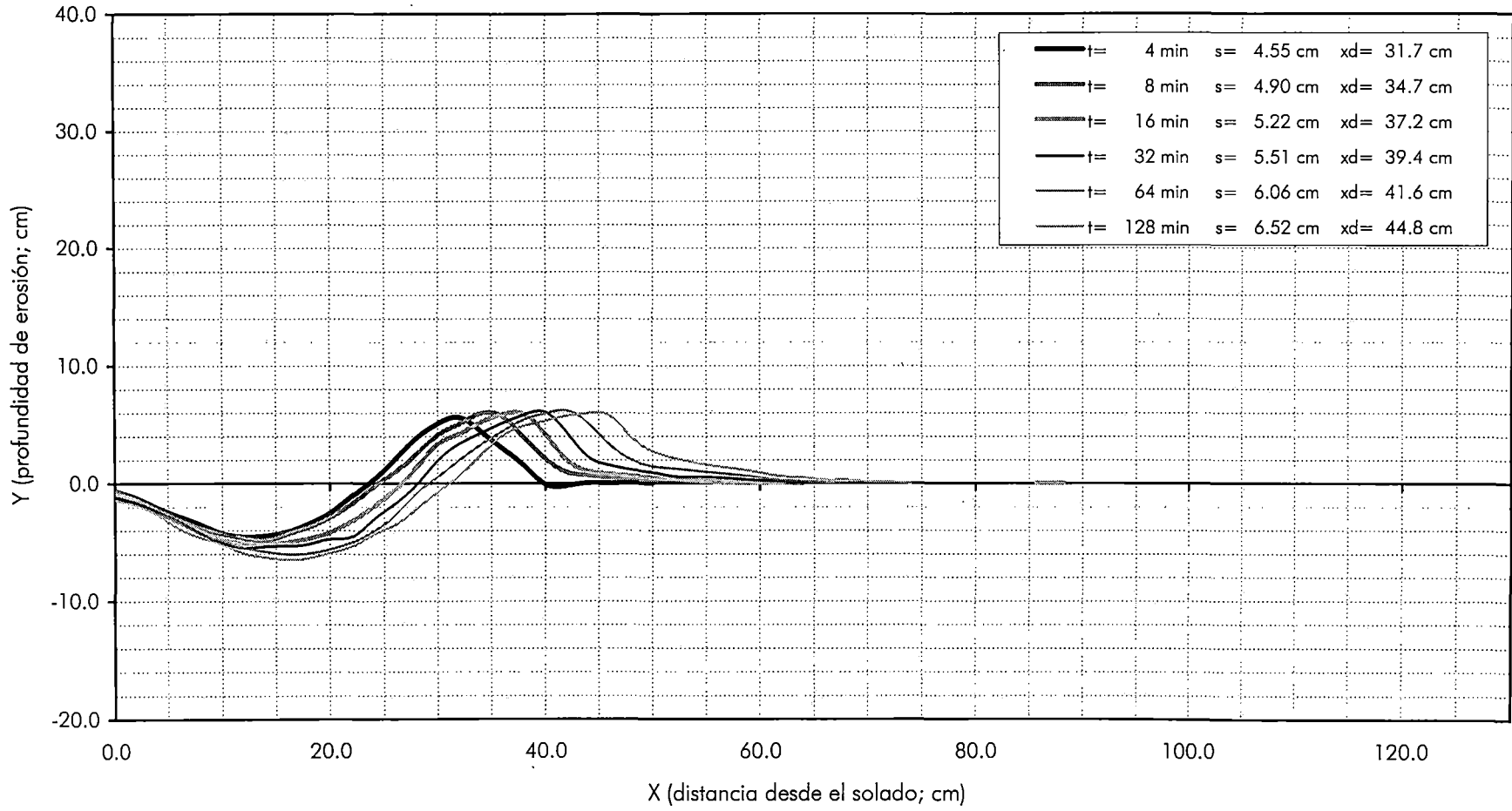


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 3



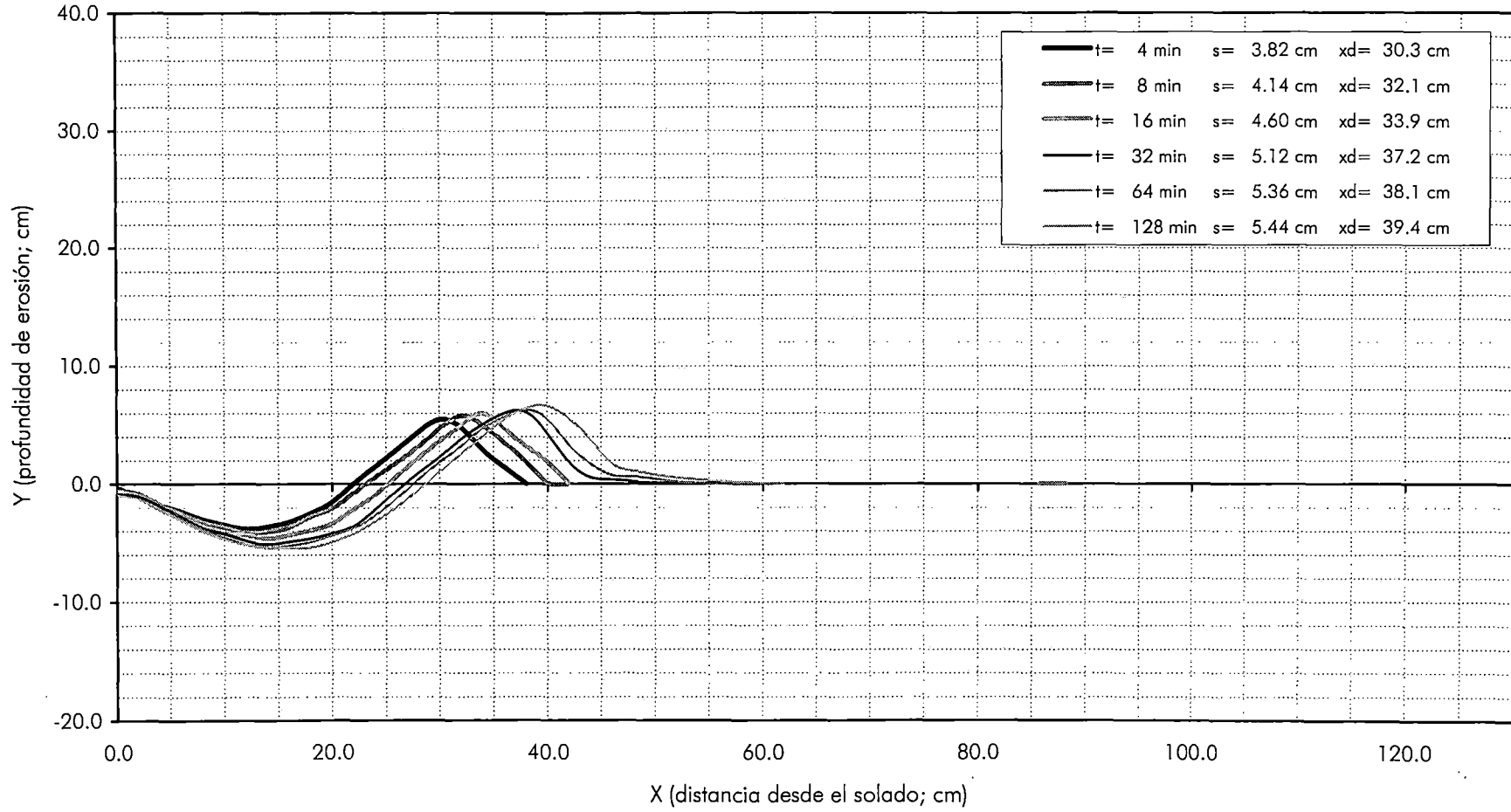
Suelo 1 L = 40 cm b = 5 cm h = 30 cm V = 0,500 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 4



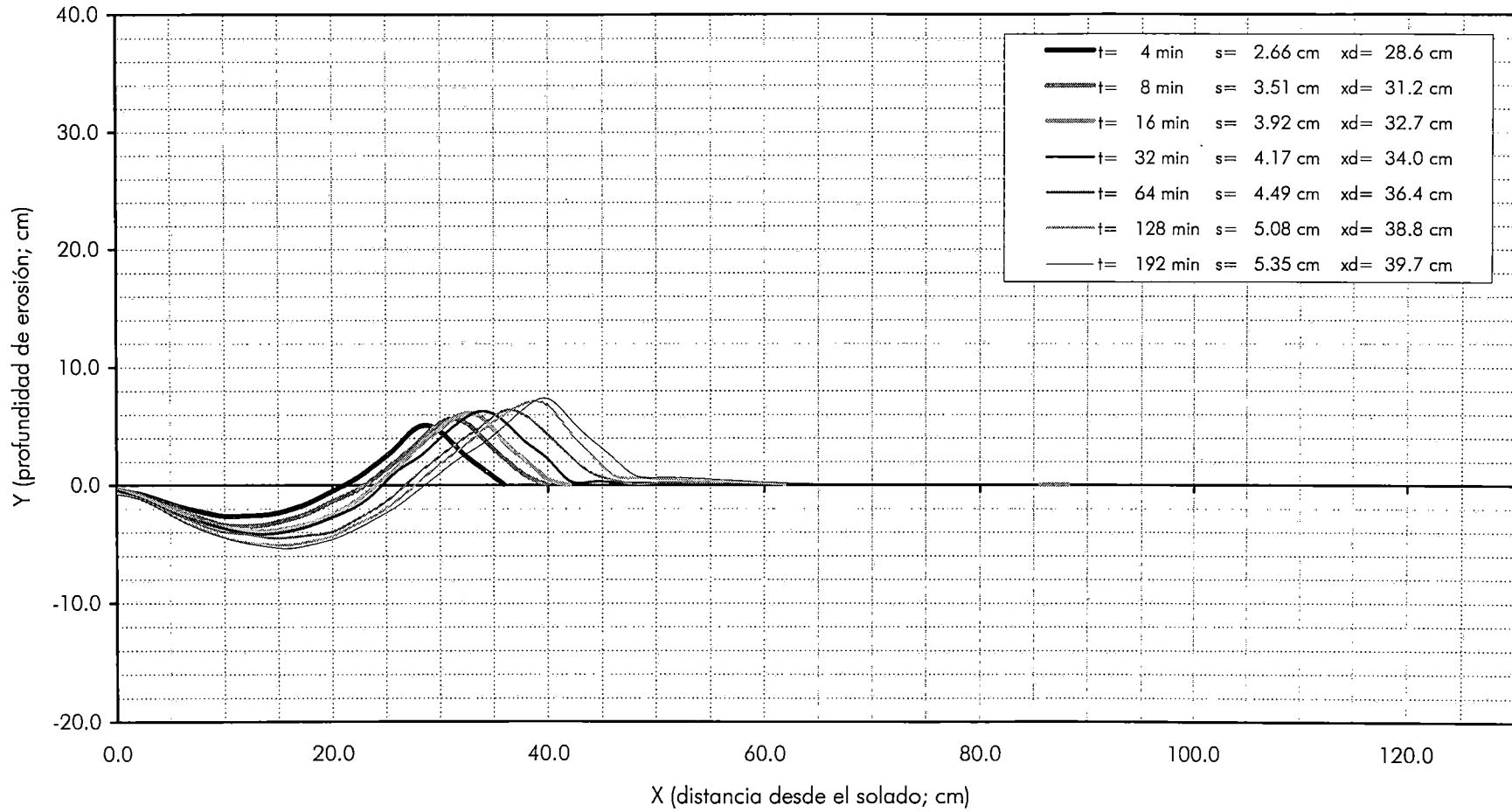
Suelo 1 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,417 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 5

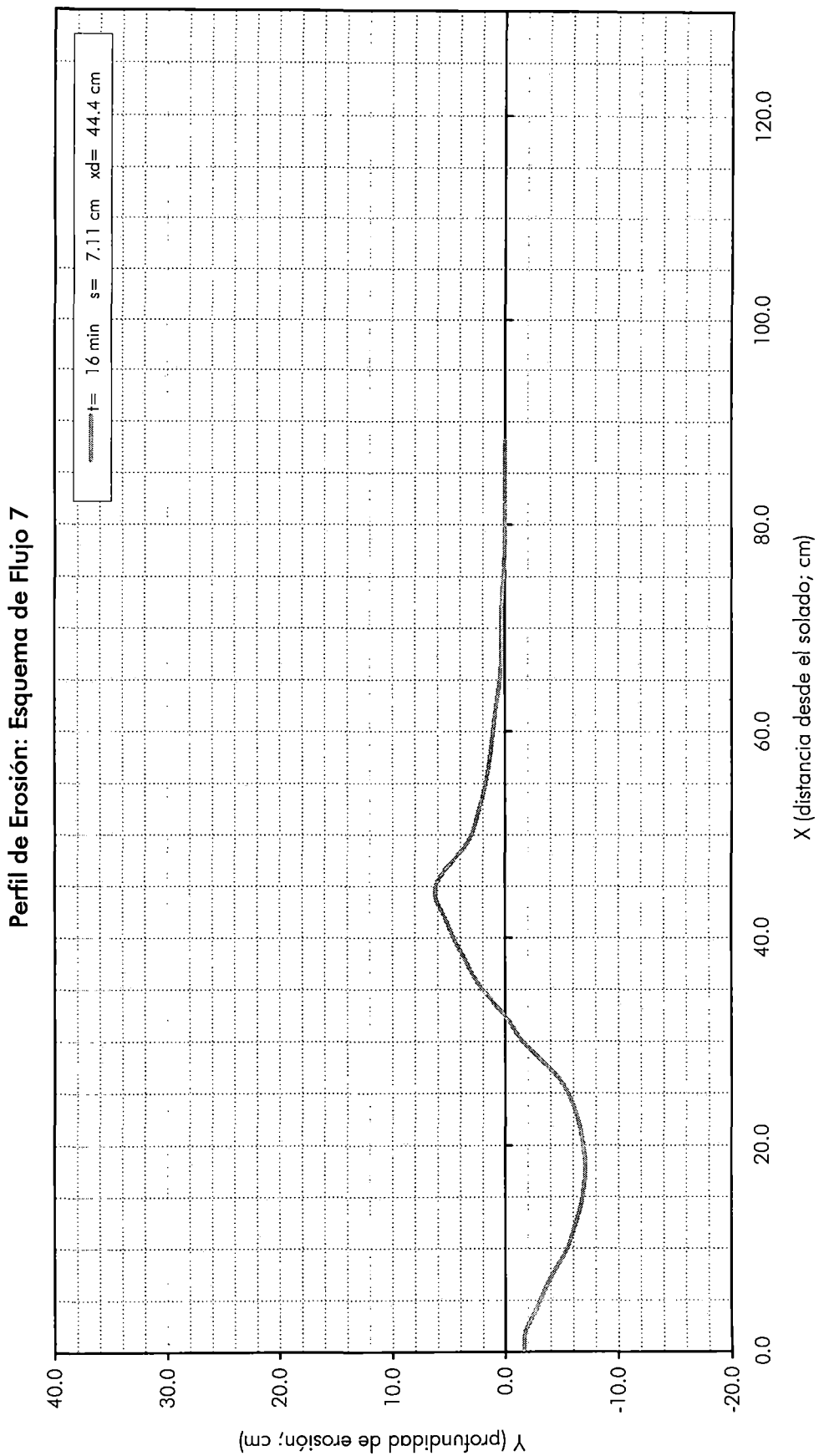


Suelo 1 L = 40 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,357 m/s

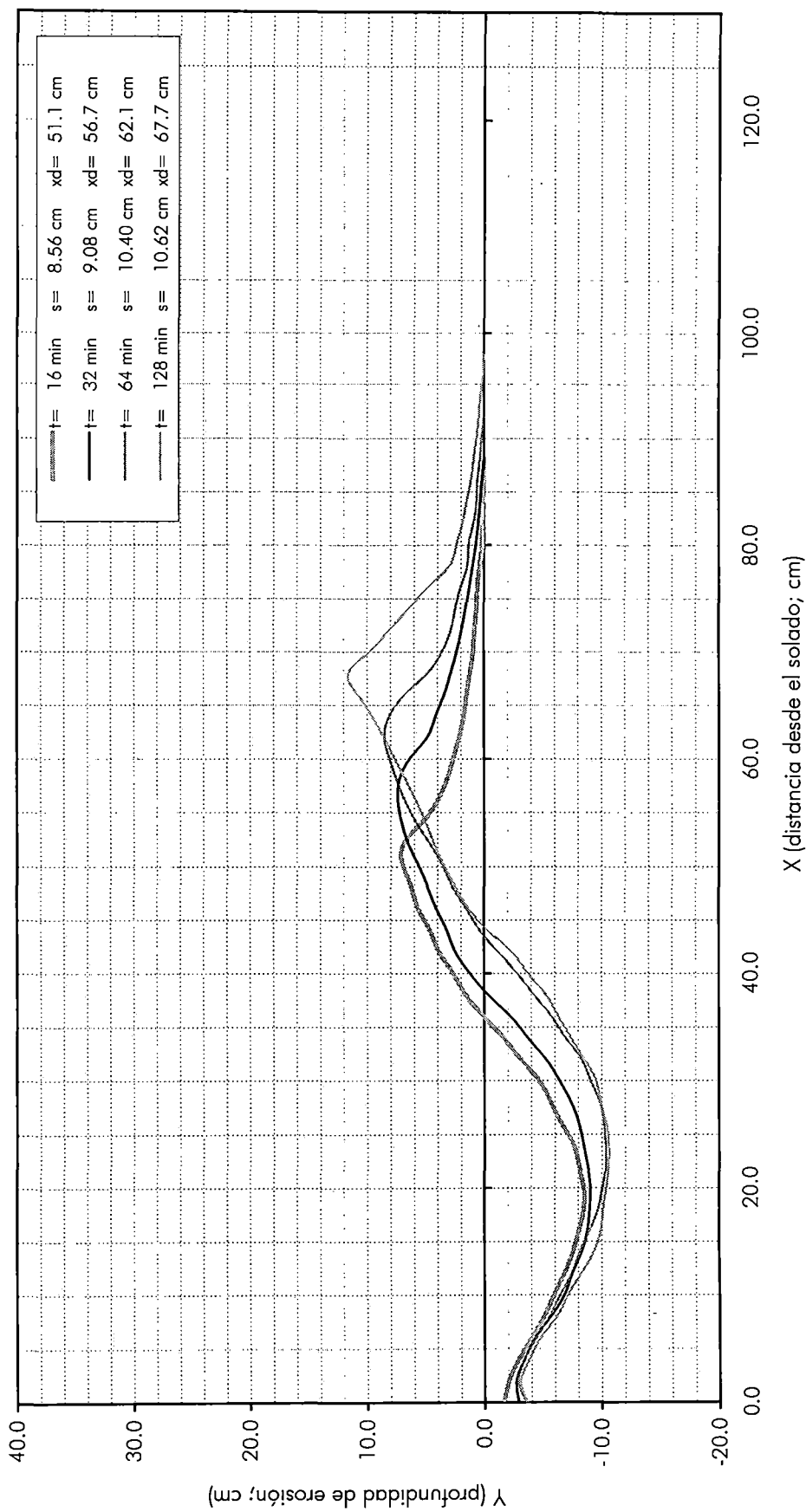
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 6



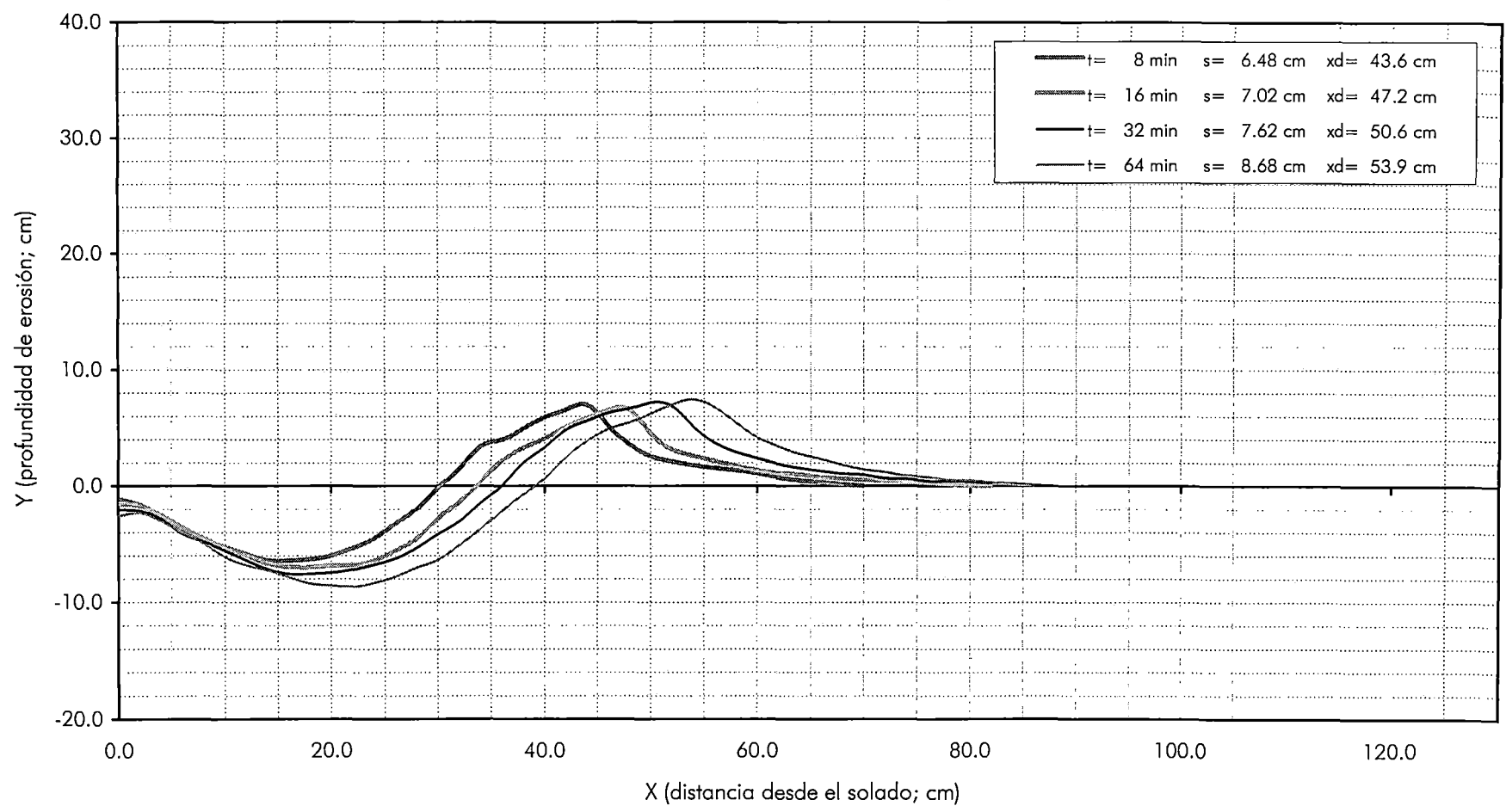
Suelo 1 $L = 40$ cm $b = 8$ cm $h = 30$ cm $V = 0,313$ m/s



Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 8

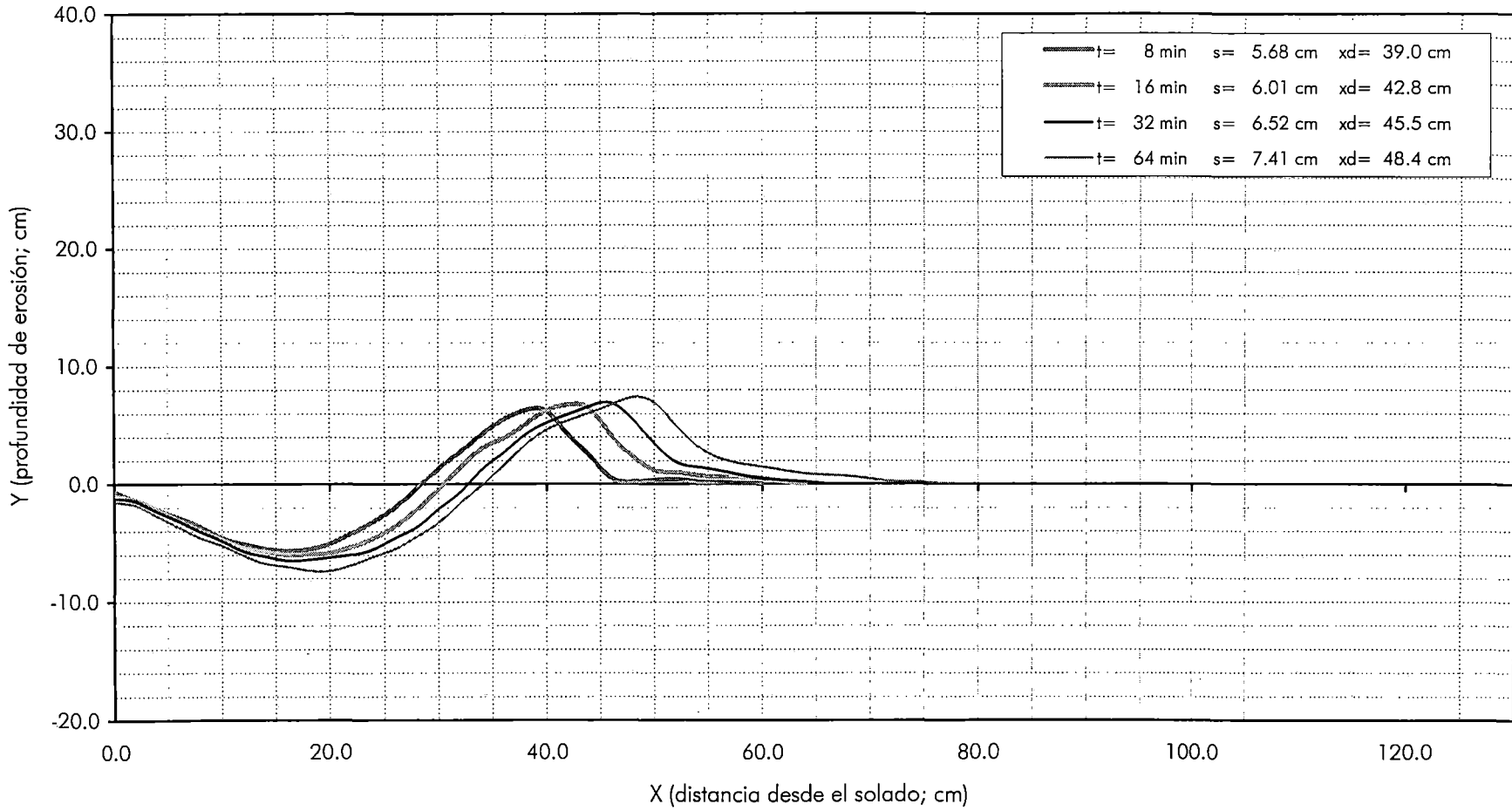


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 9

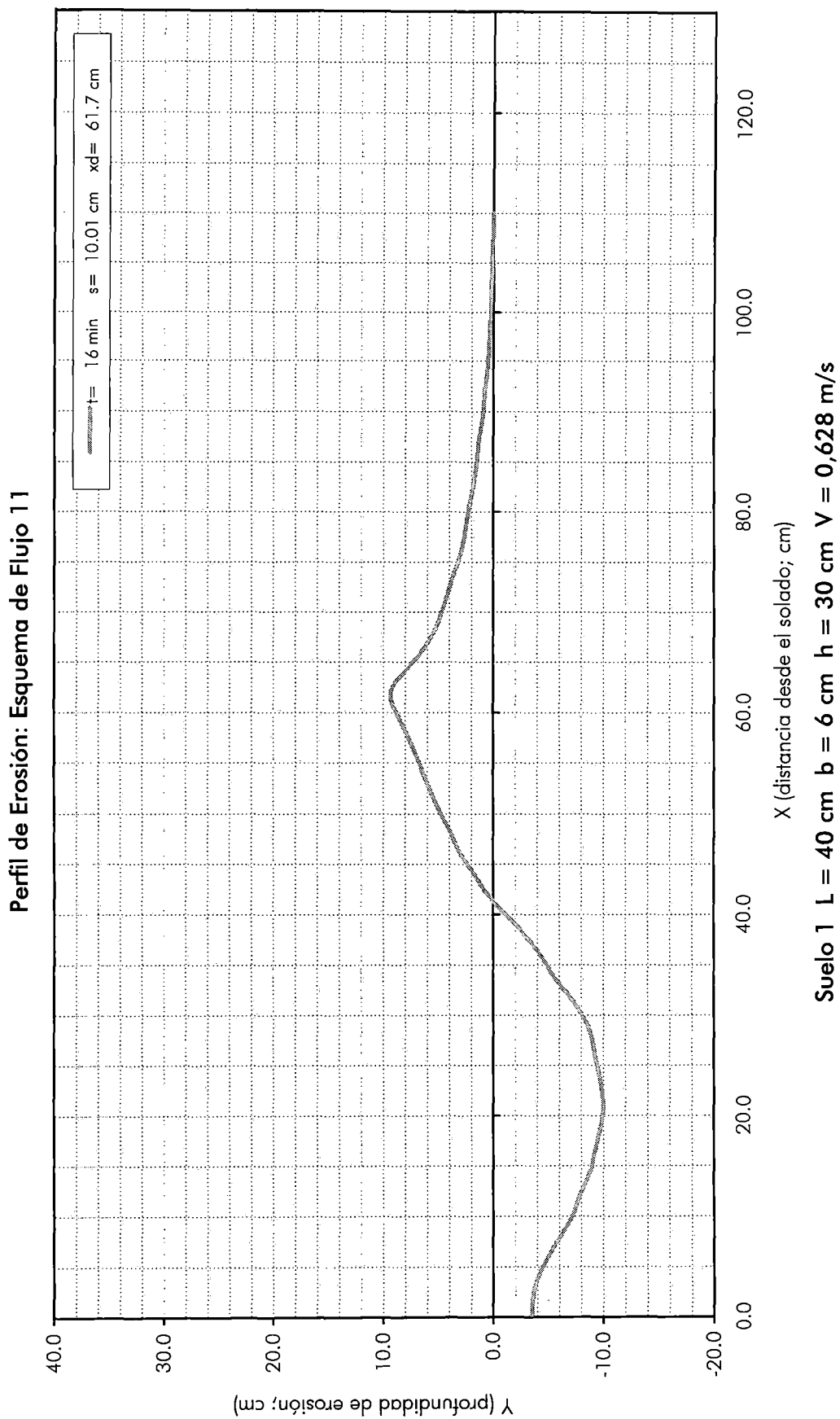


Suelo 1 L = 40 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,477 m/s

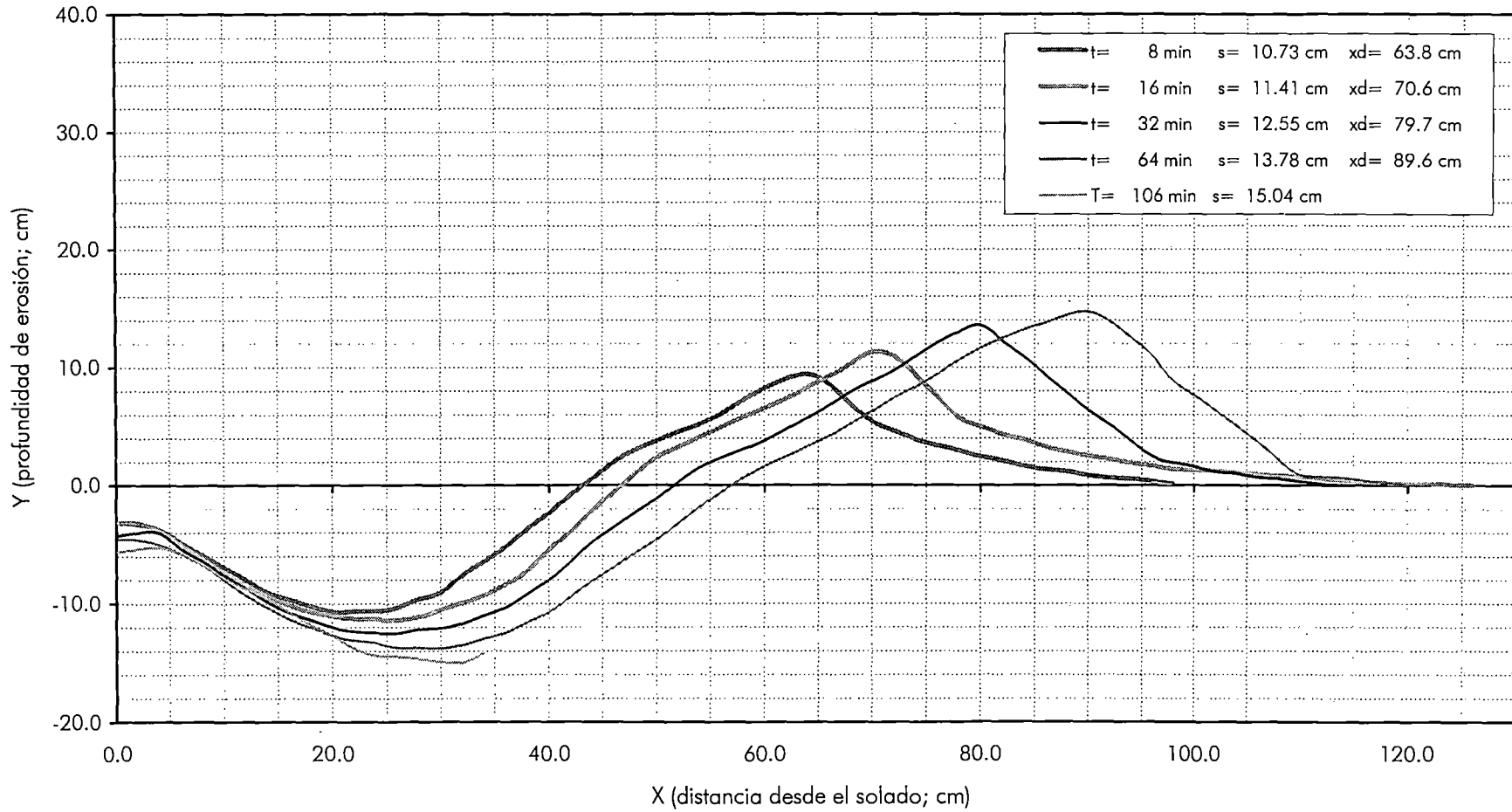
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 10



Suelo 1 L = 40 cm b = 8 cm h = 30 cm V = 0,418 m/s

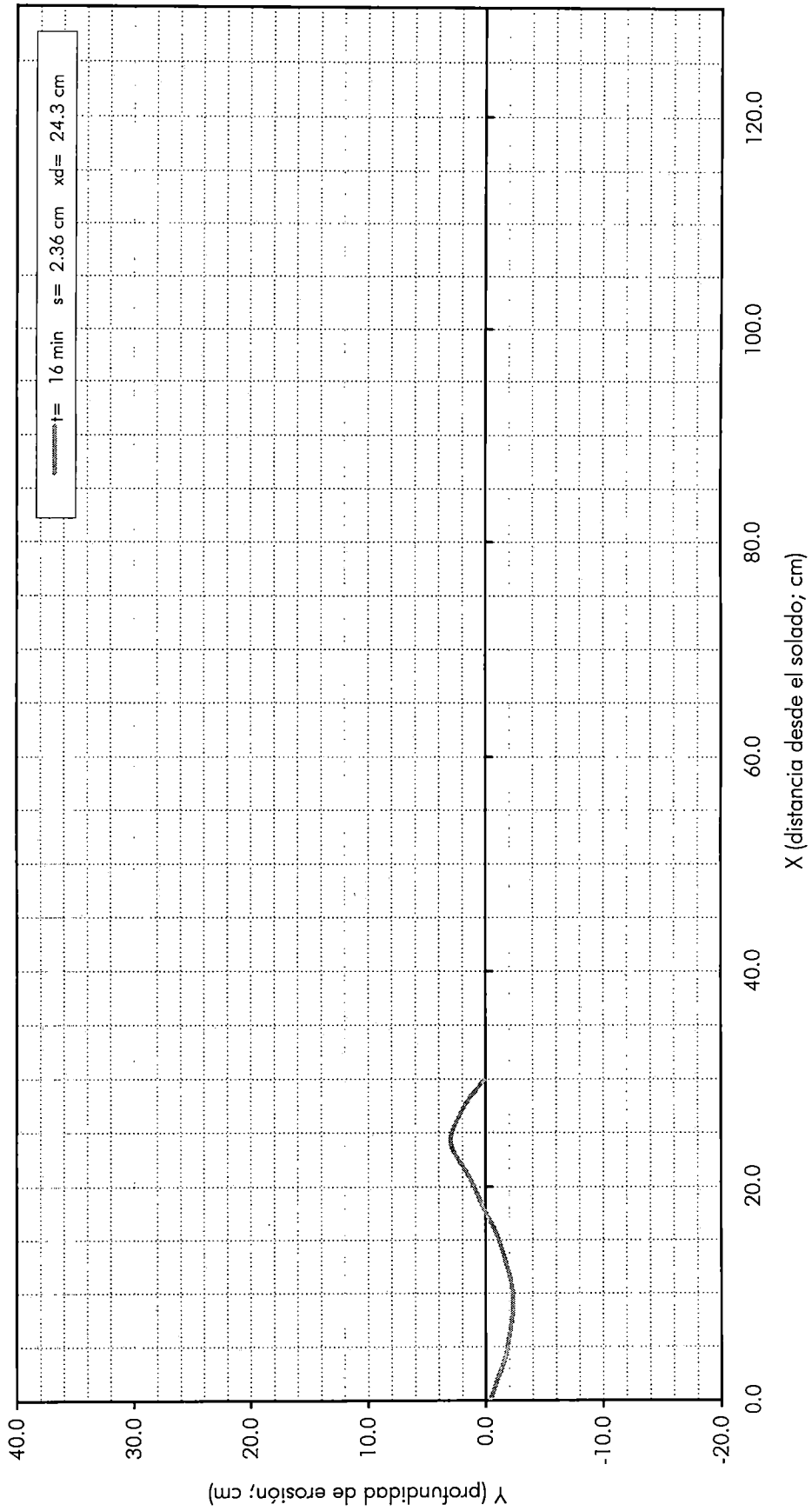


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 12

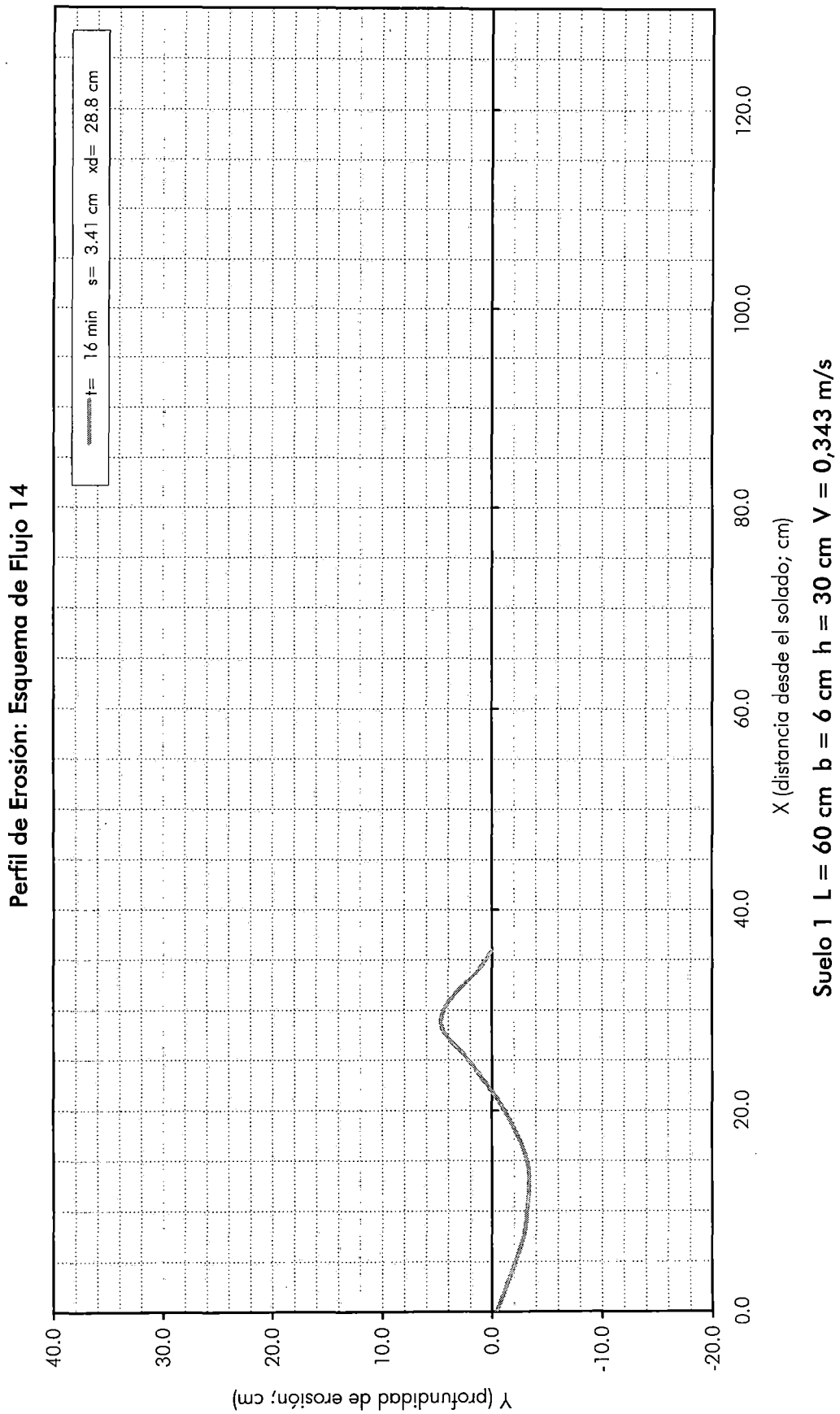


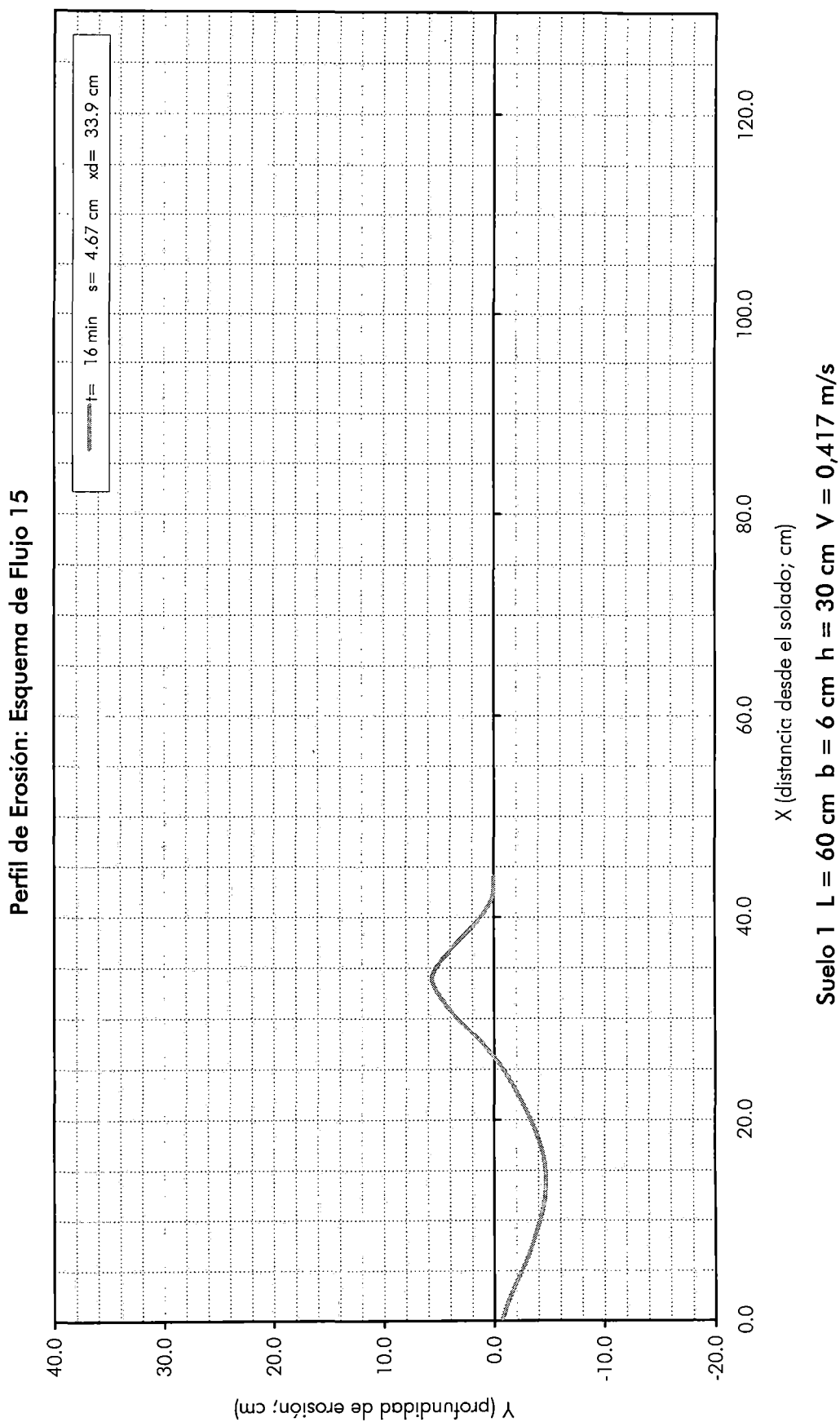
Suelo 1 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,696 m/s

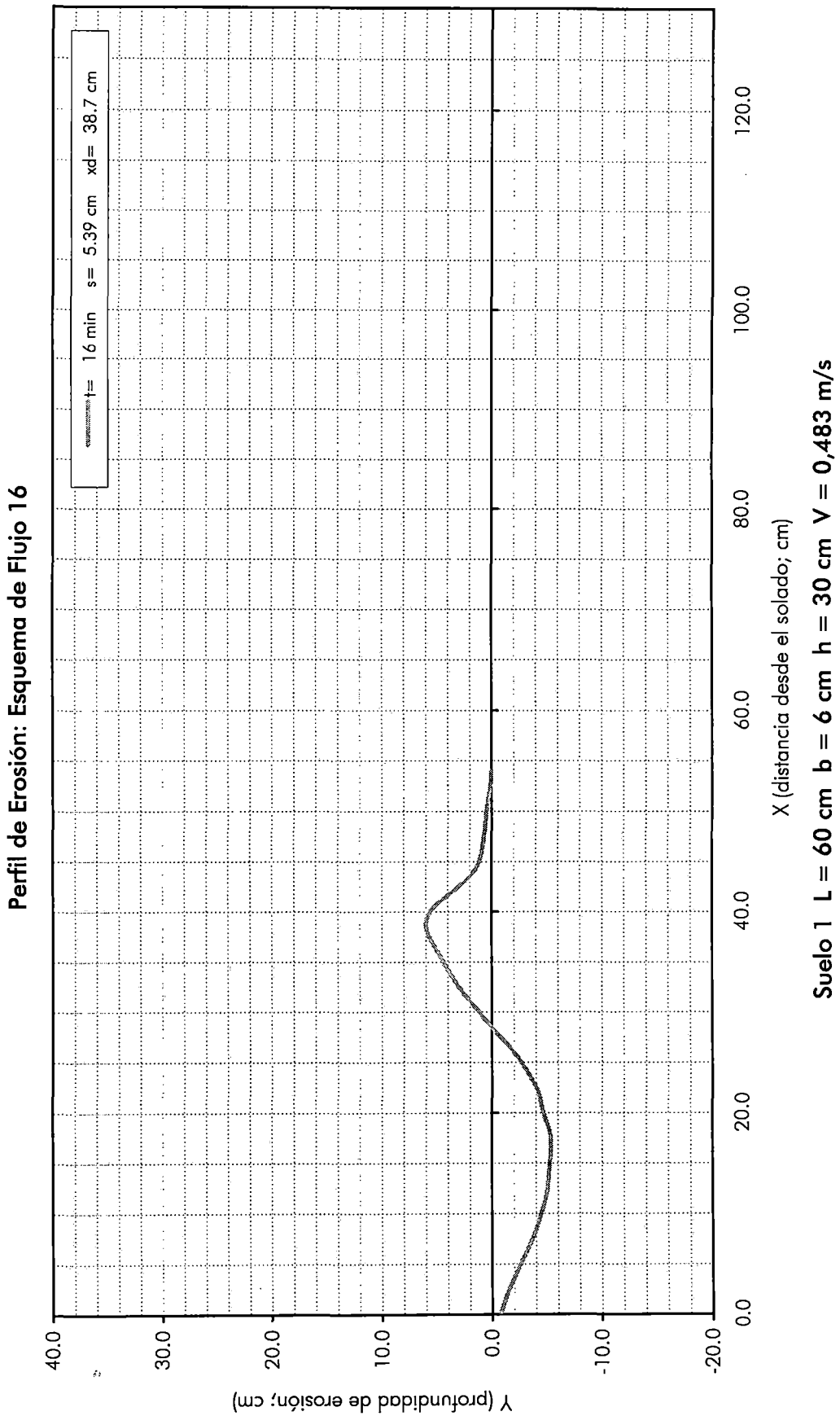
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 13



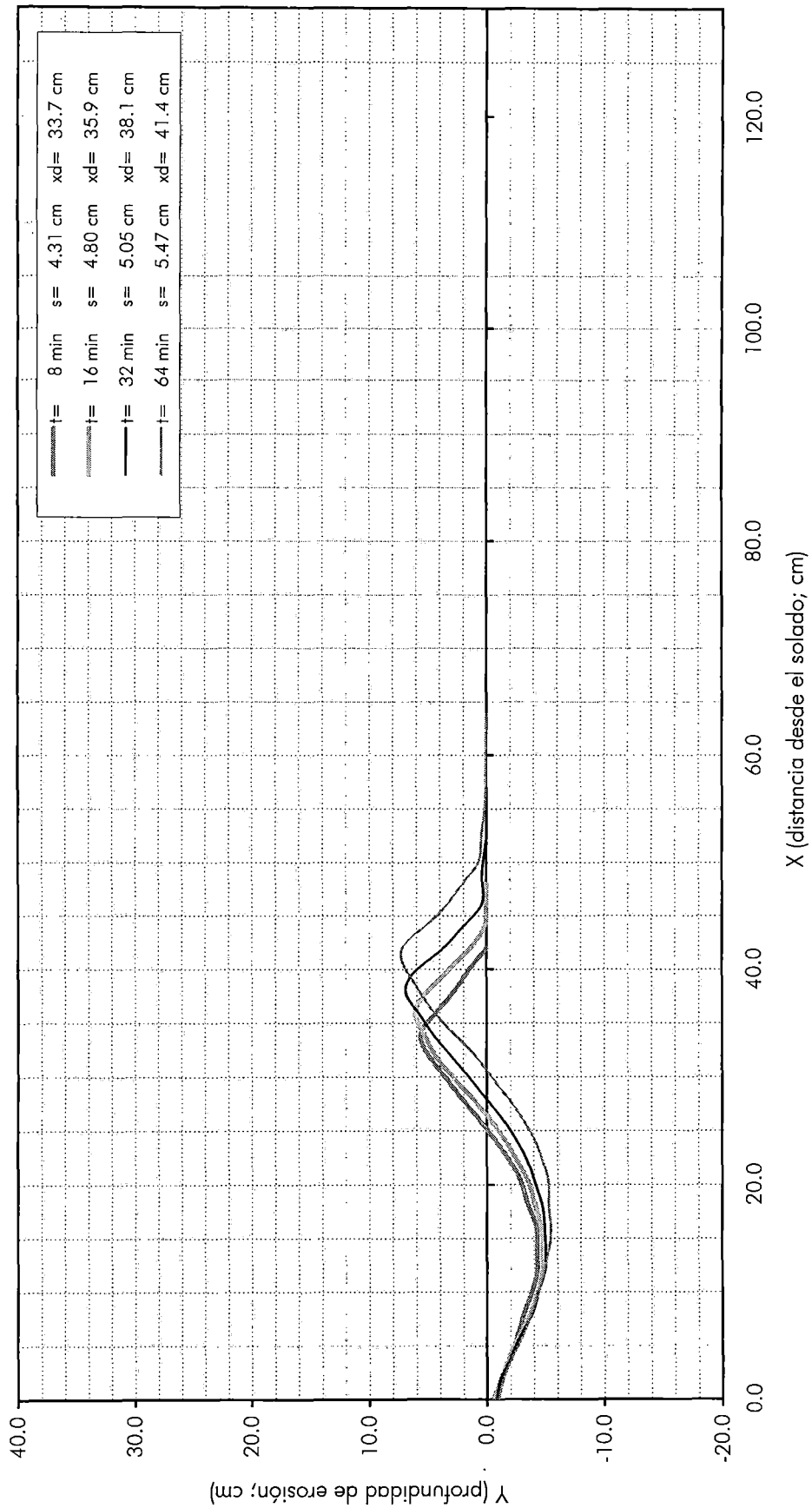
Suelo 1 L = 60 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,278 m/s





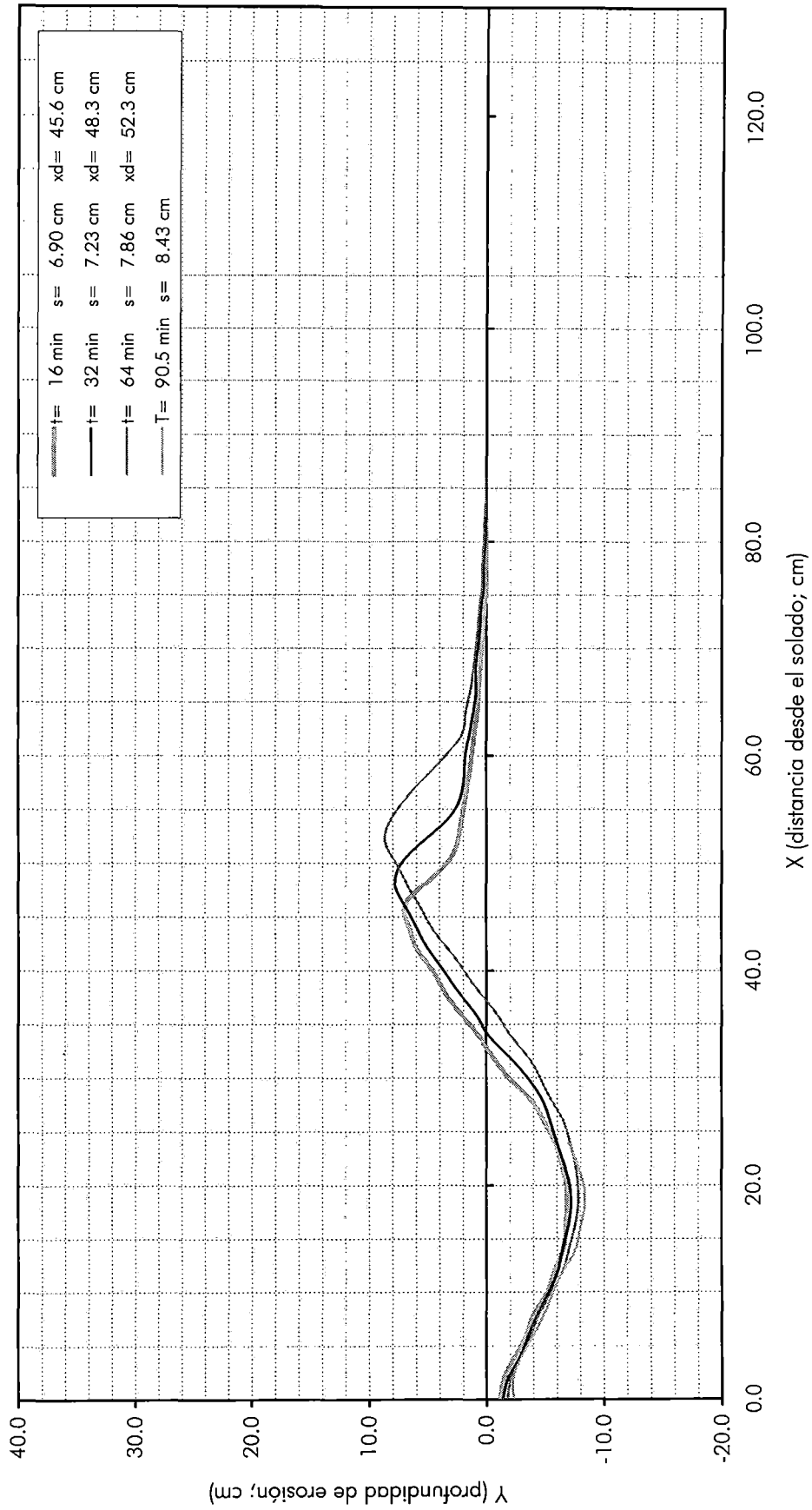


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 17



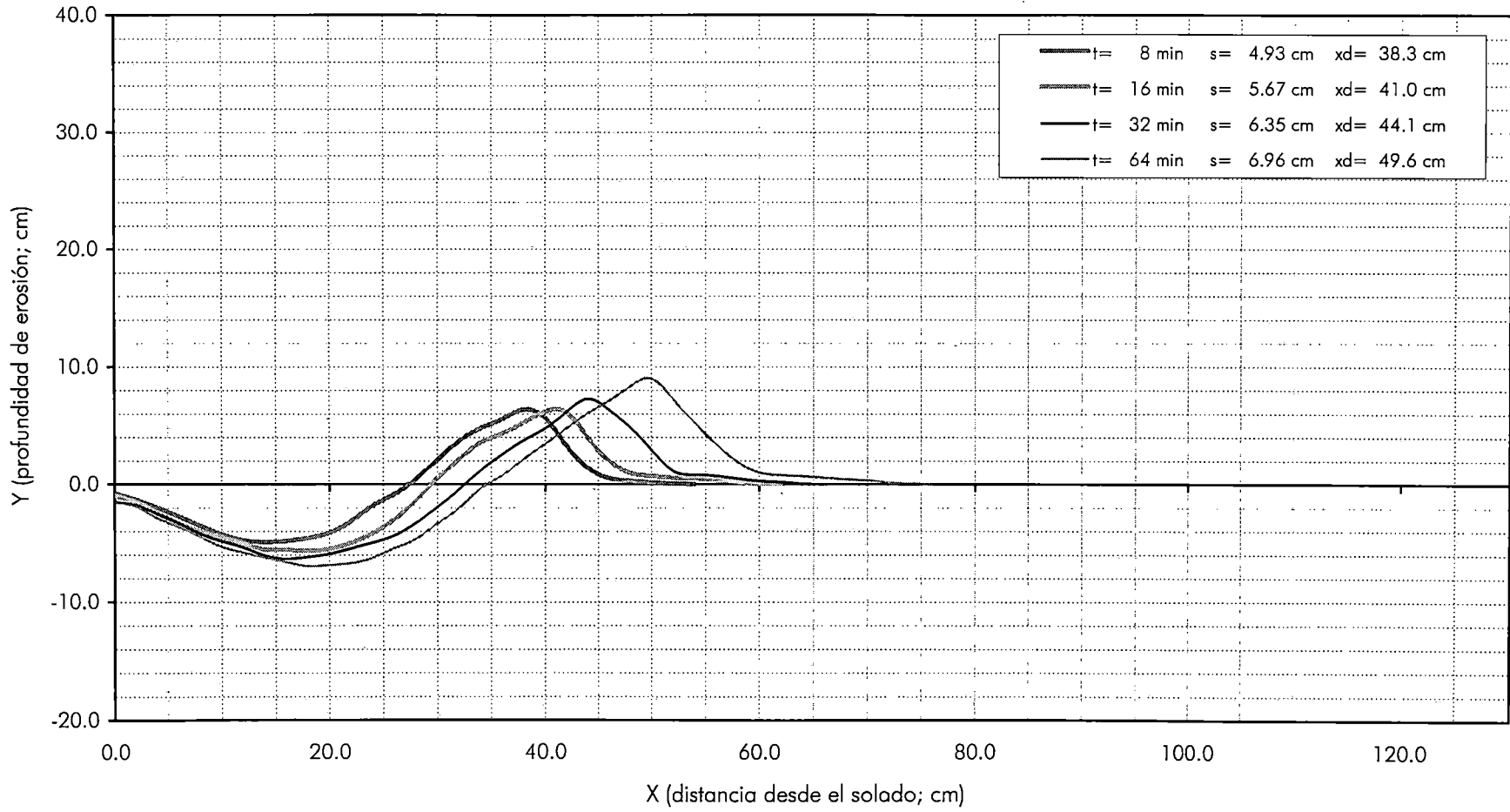
Suelo 1 L = 60 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,419 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 18



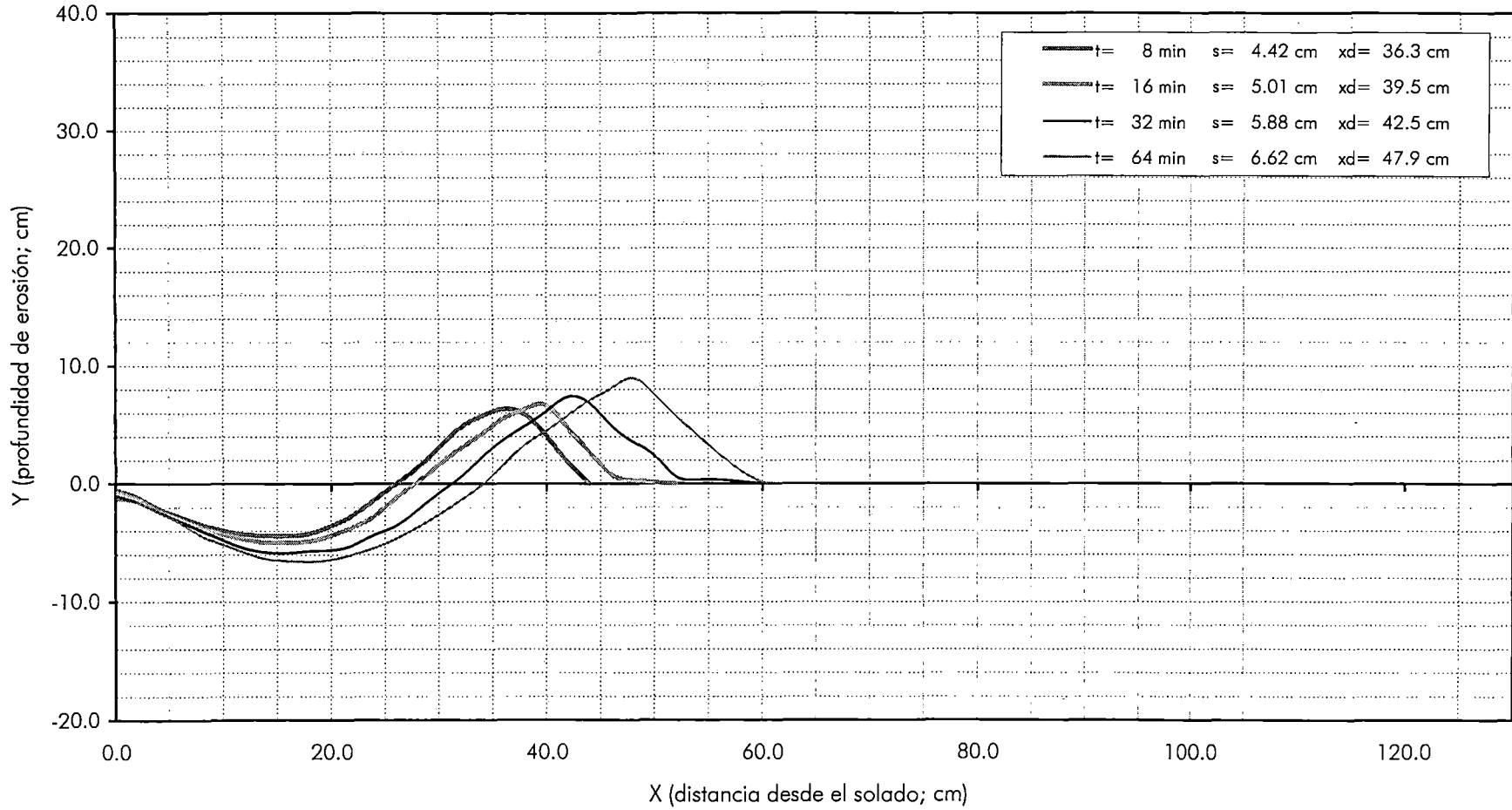
Suelo 1 L = 60 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,557 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 19



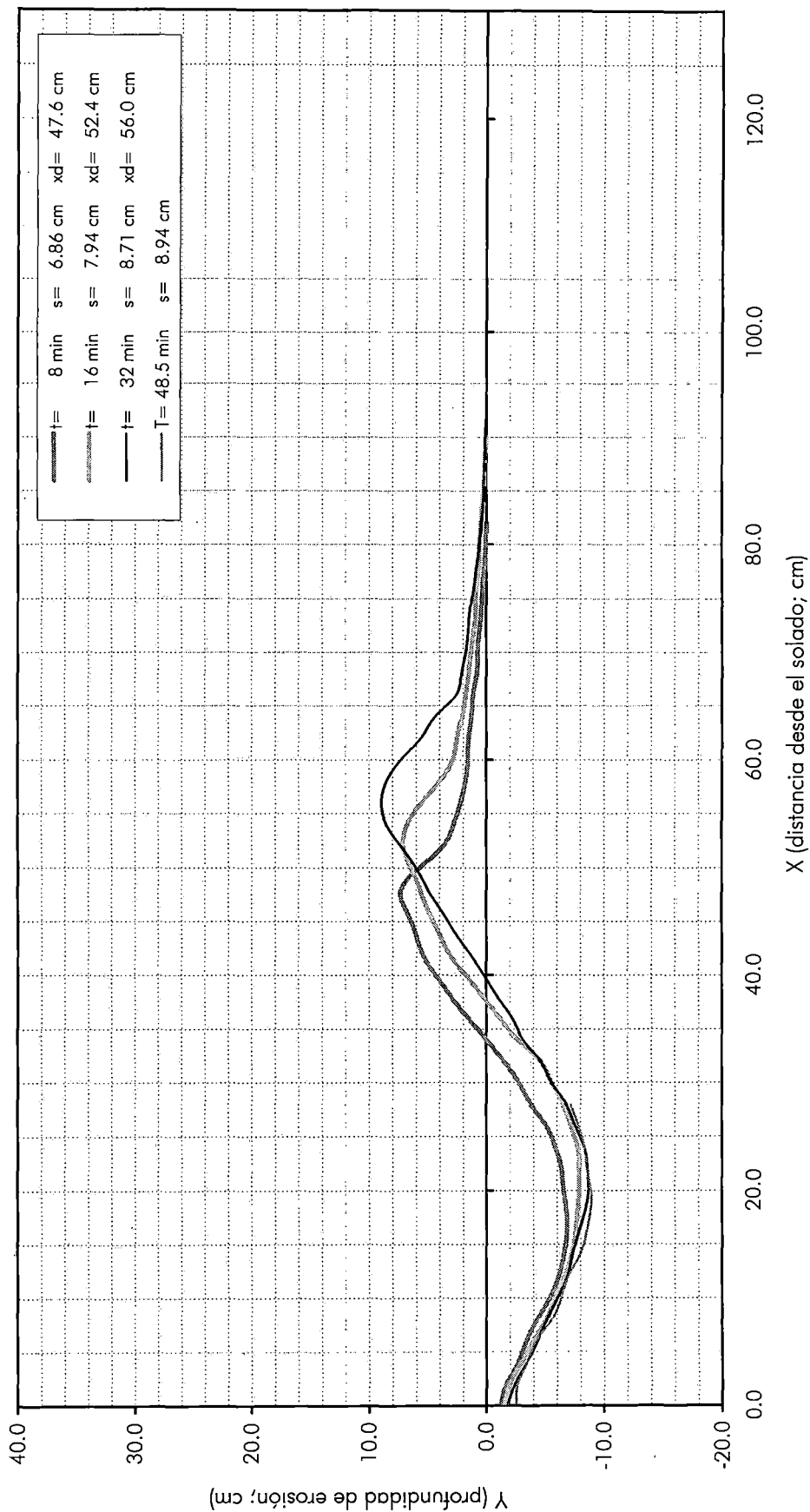
Suelo 1 L = 60 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,477 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 20

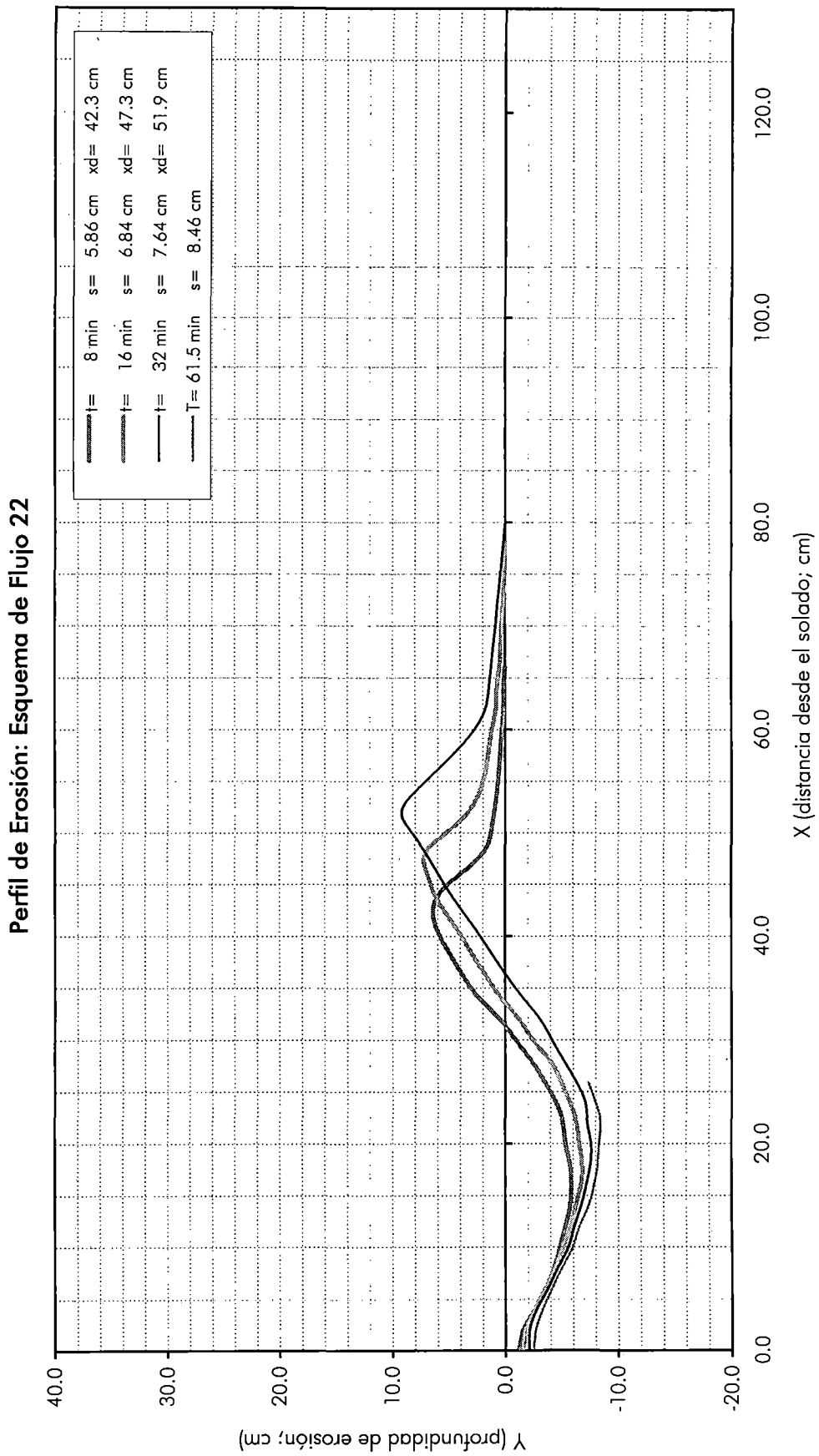


Suelo 1 L = 60 cm b = 8 cm h = 30 cm V = 0,418 m/s

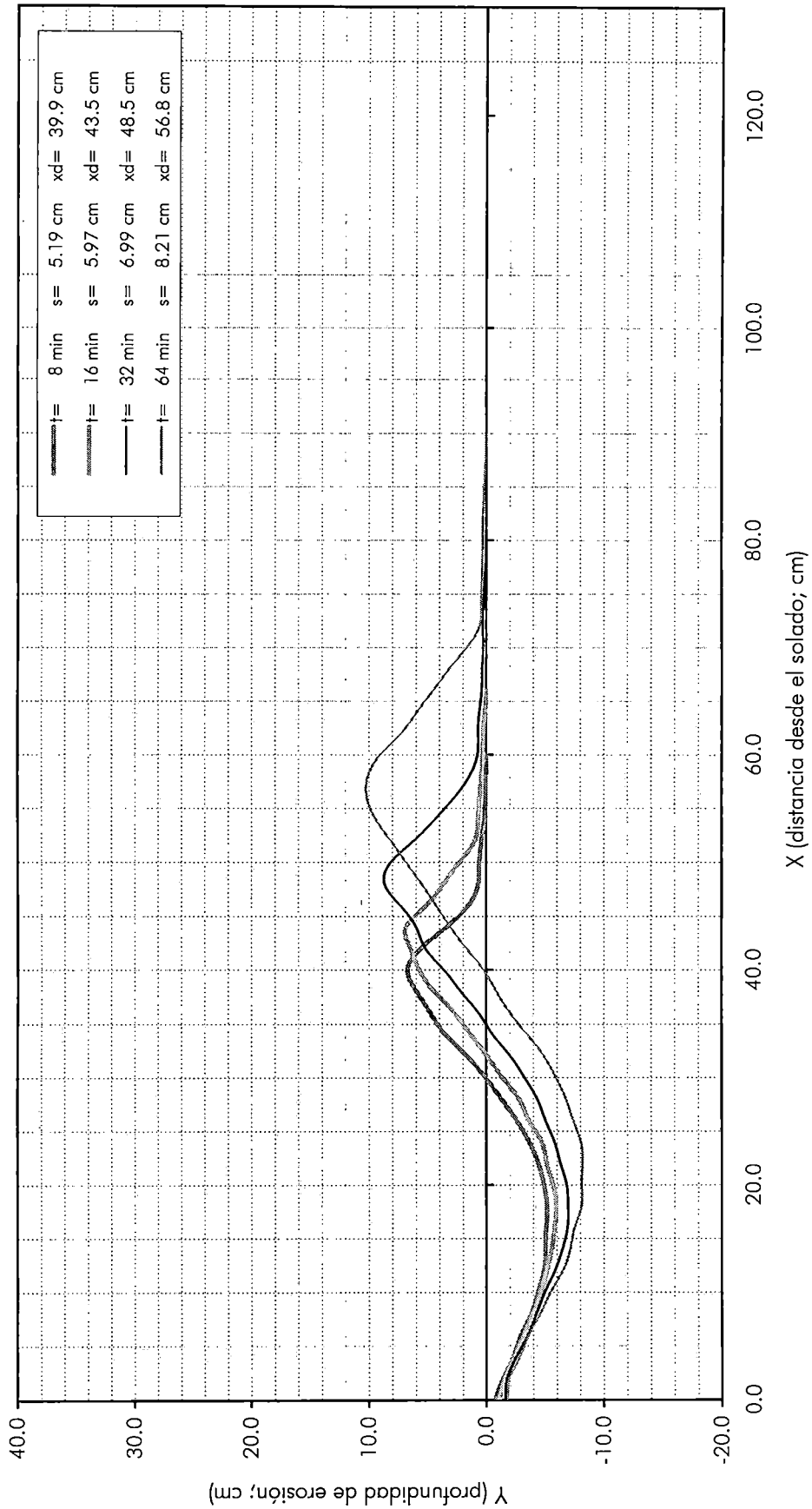
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 21



Suelo 1 L = 60 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,628 m/s

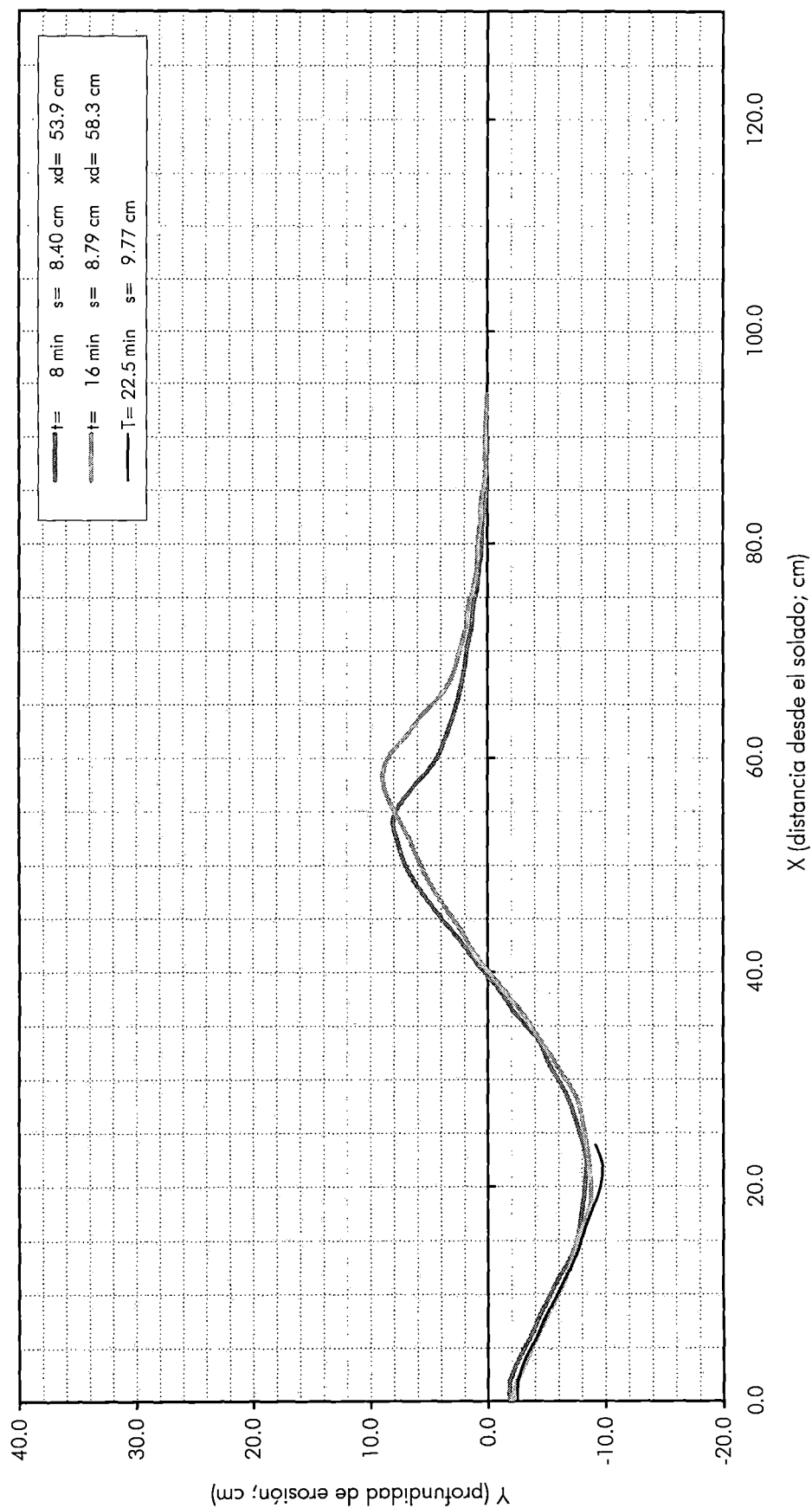


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 23

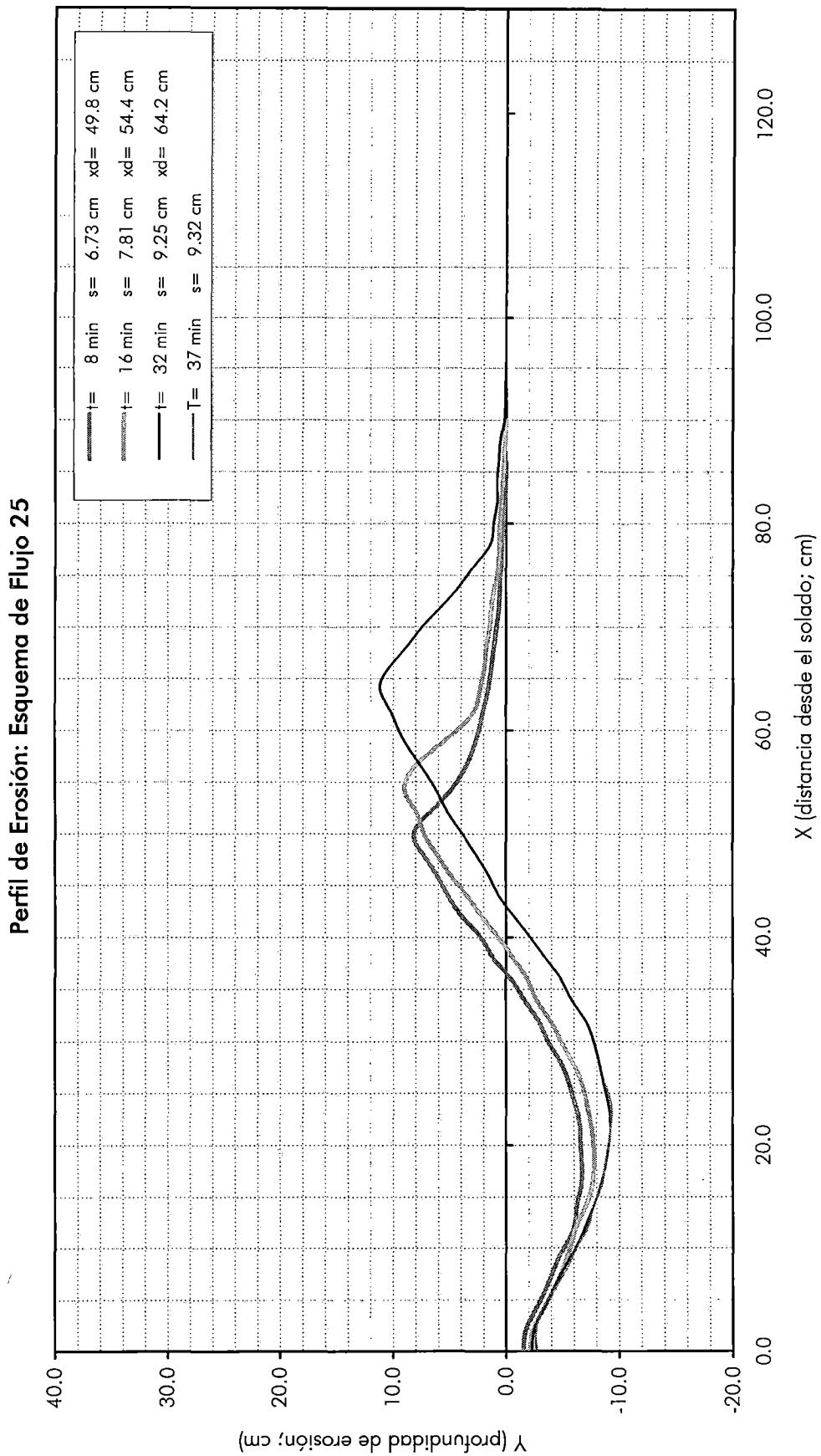


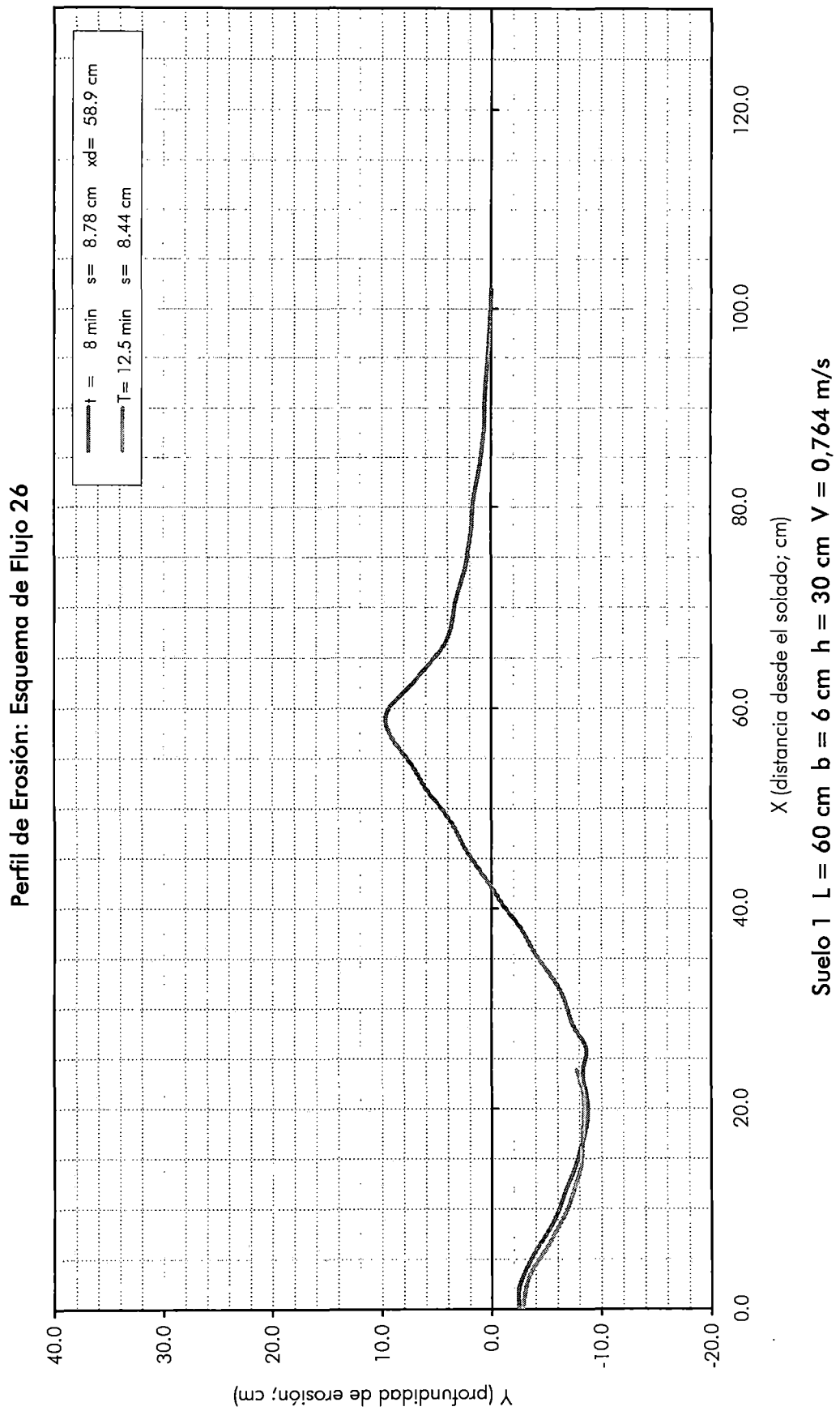
Suelo 1 L = 60 cm b = 8 cm h = 30 cm V = 0,471 m/s

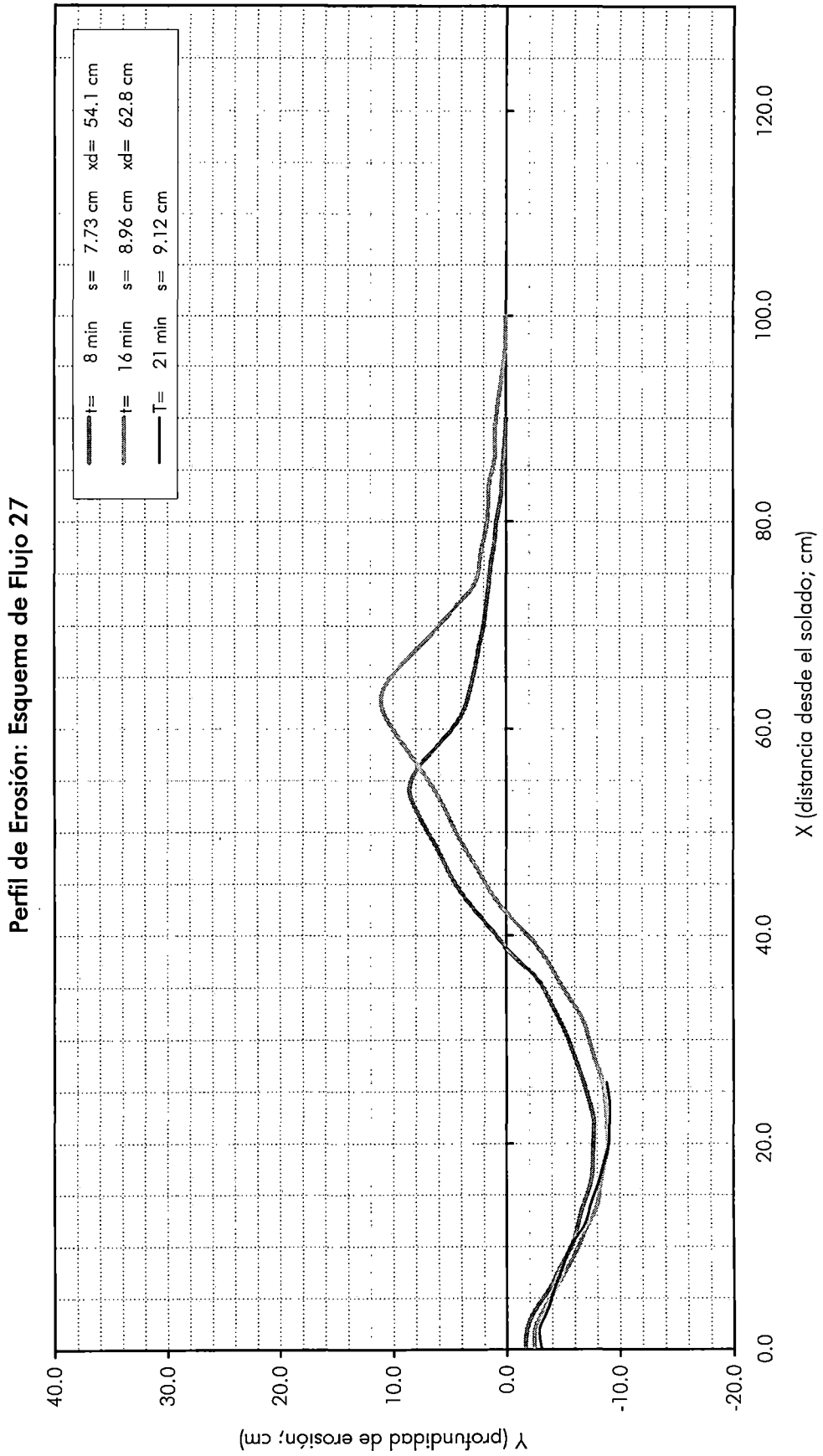
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 24



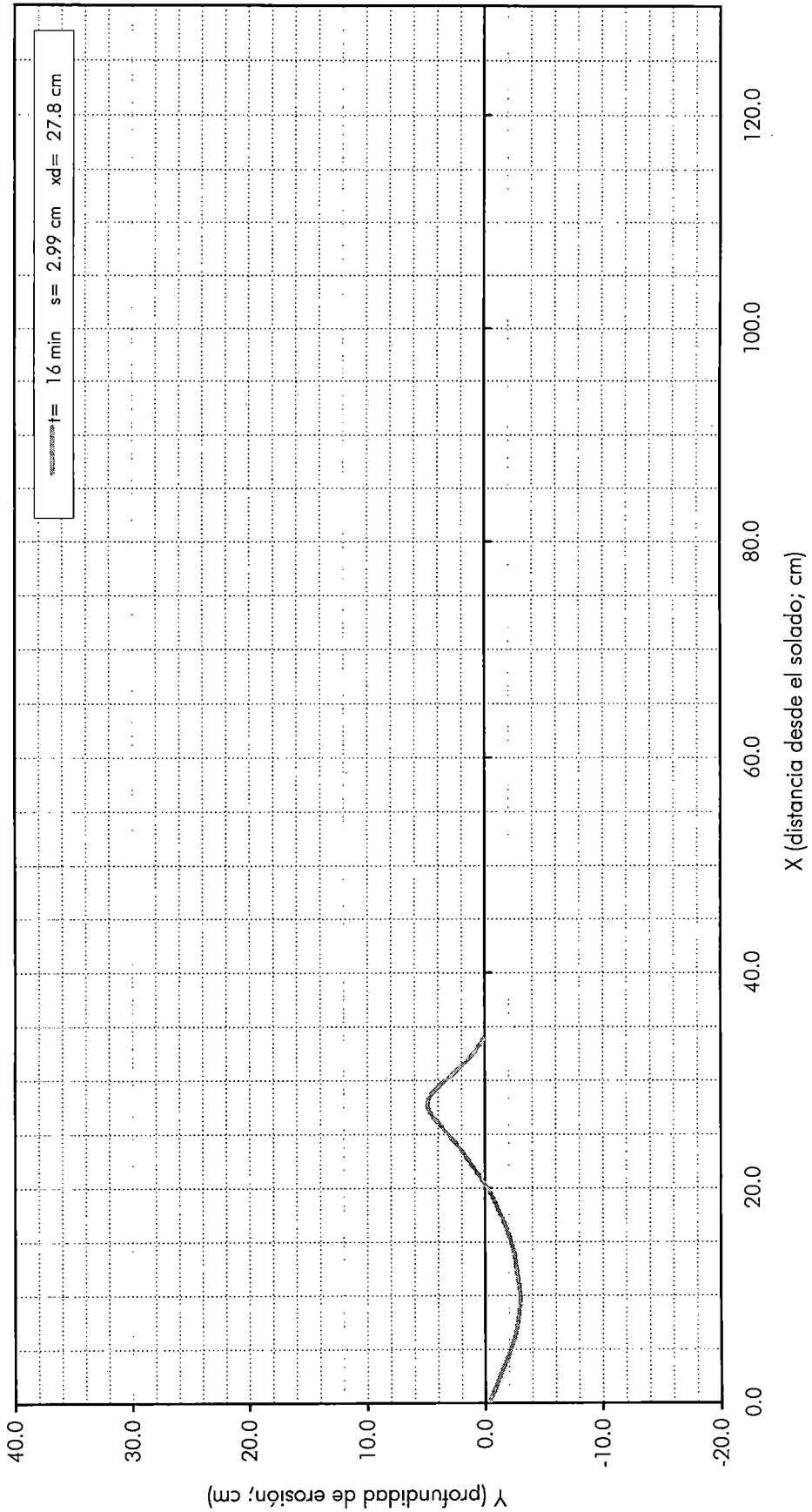
Suelo 1 L = 60 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,696 m/s



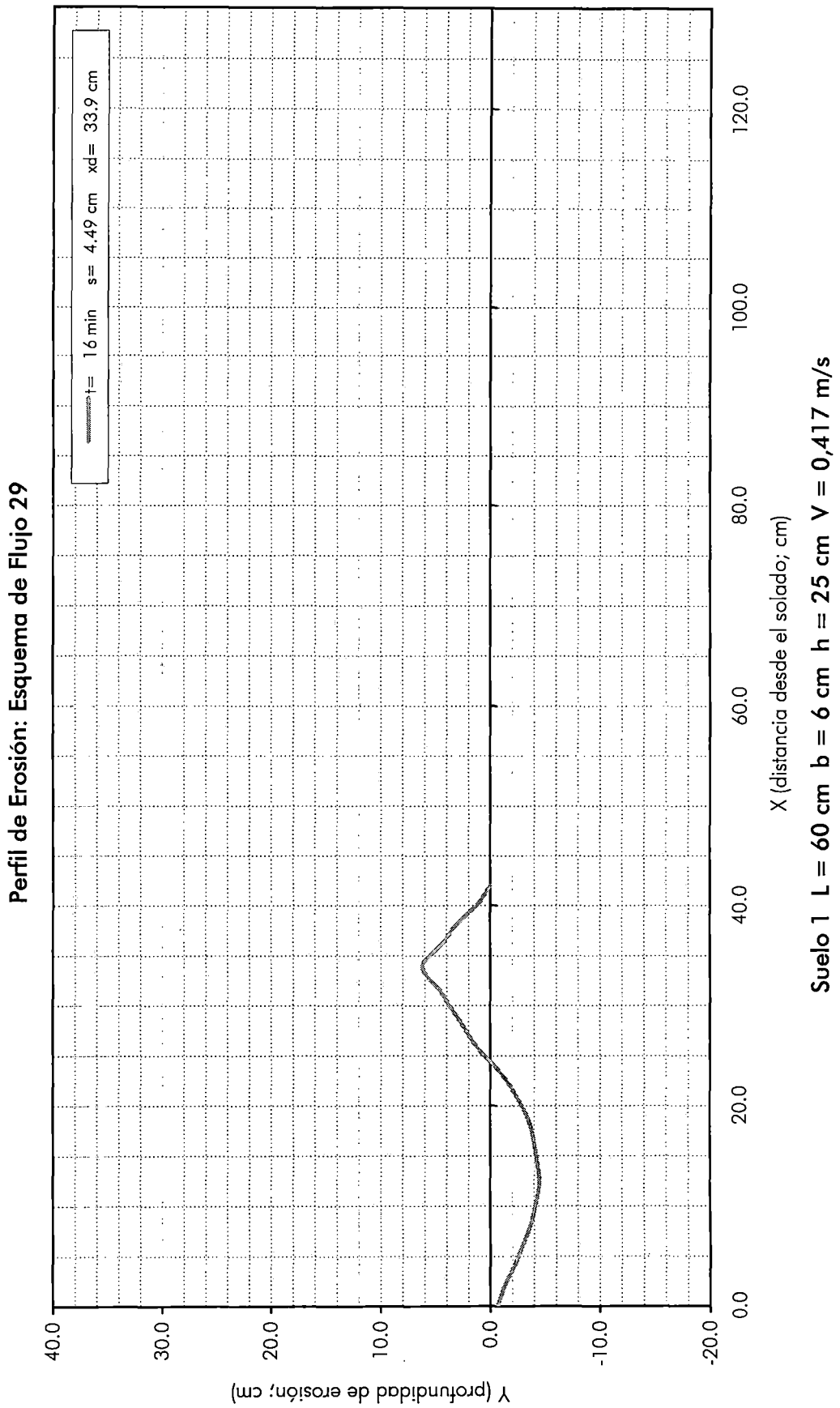


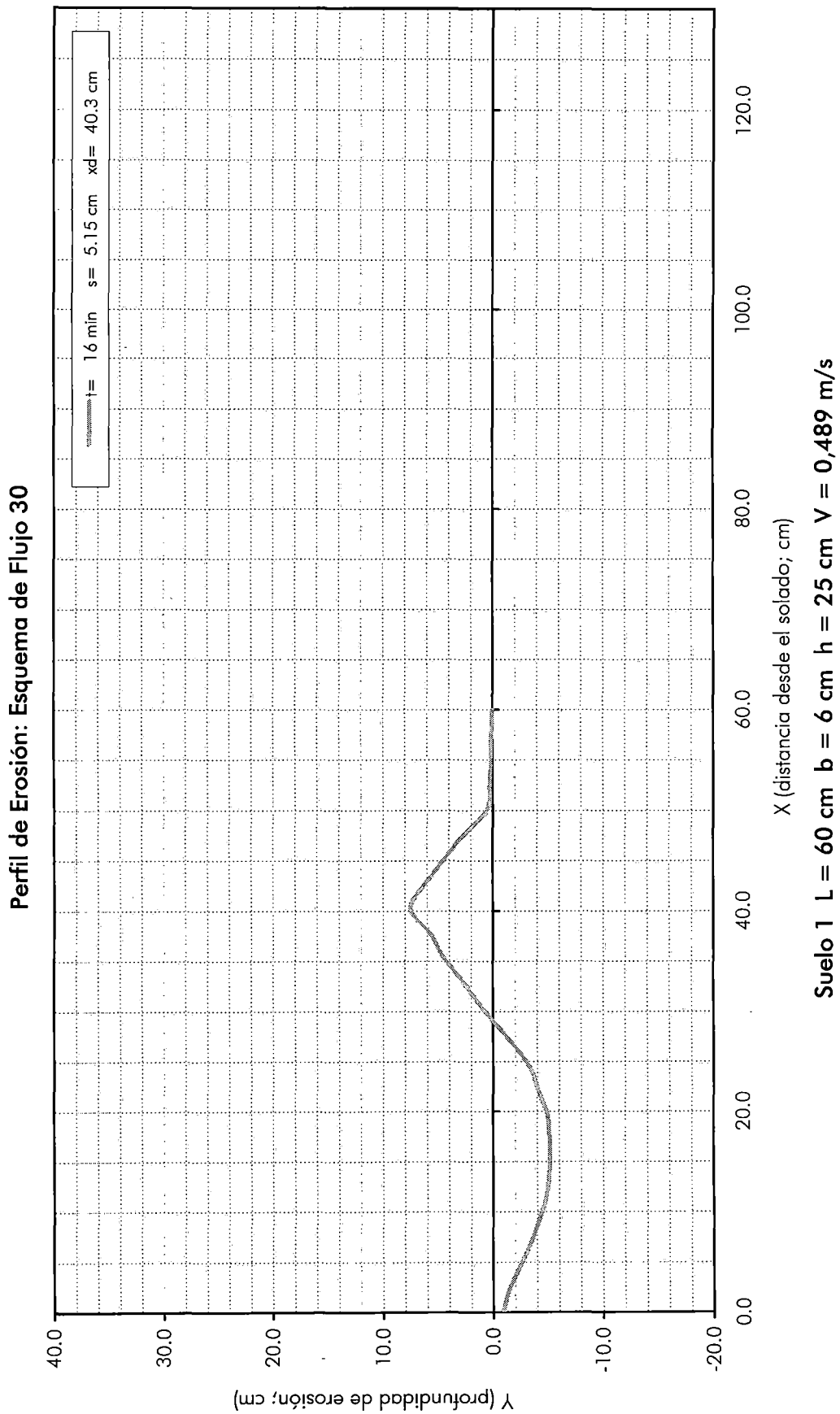


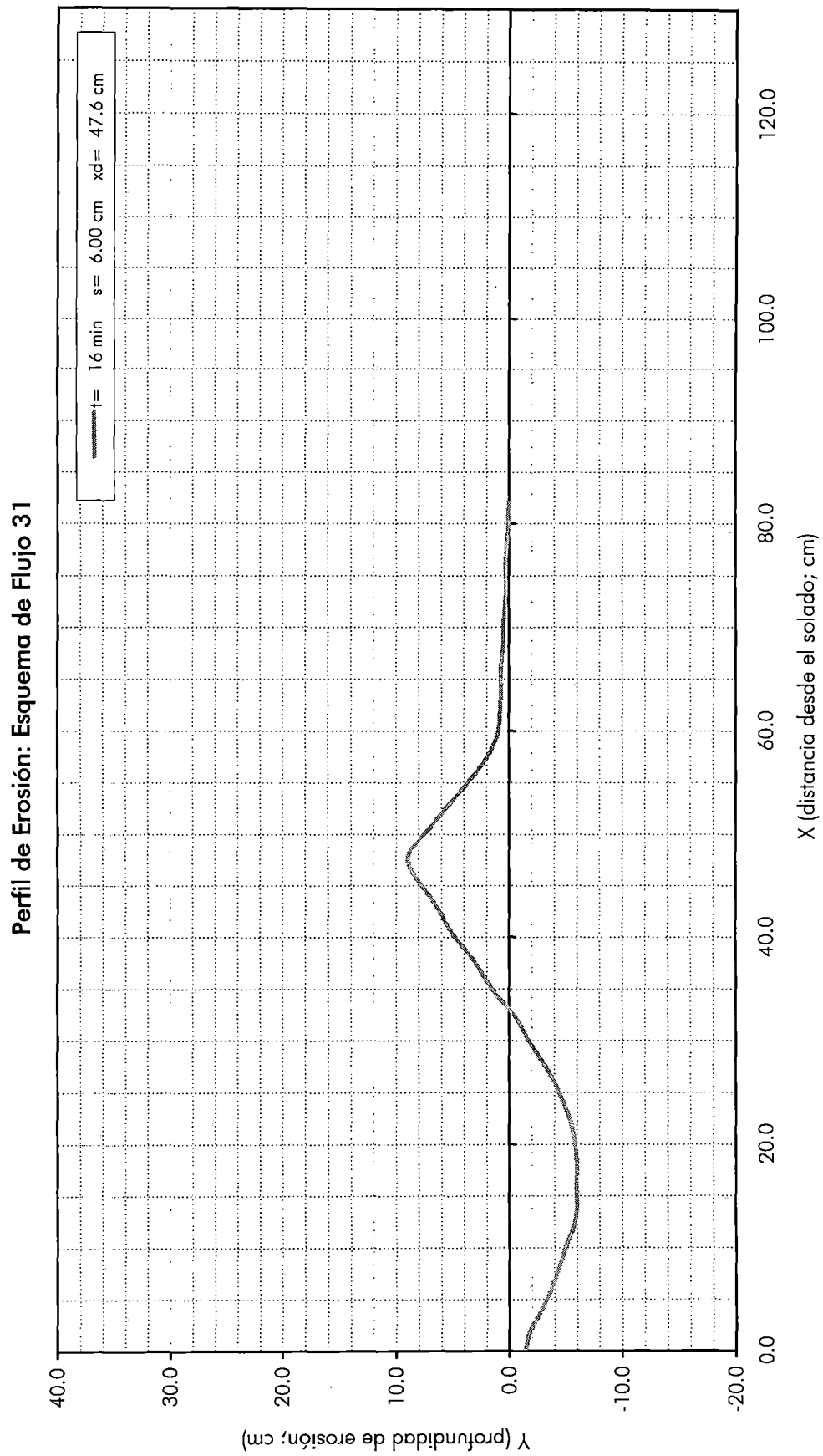
Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 28

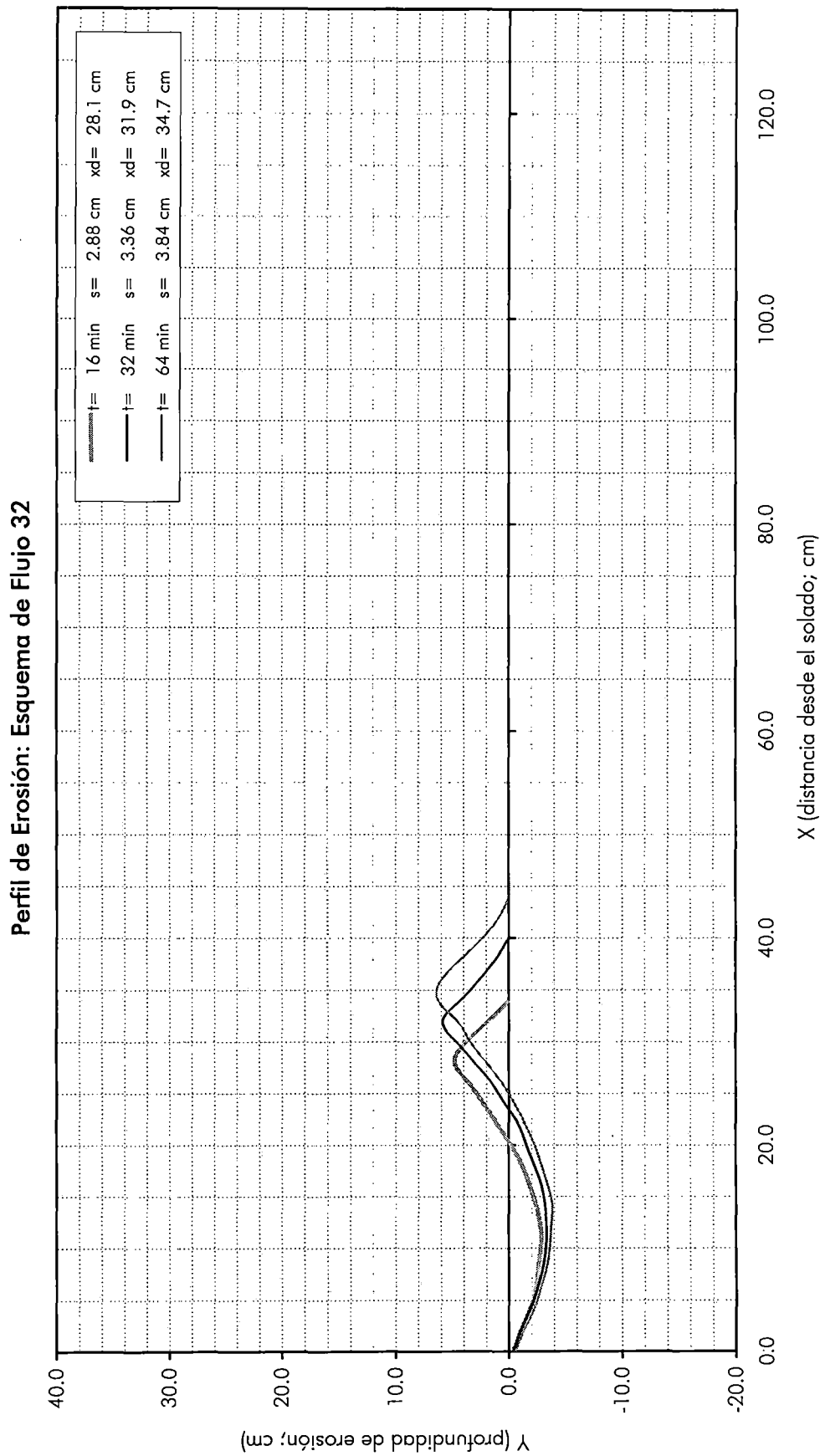


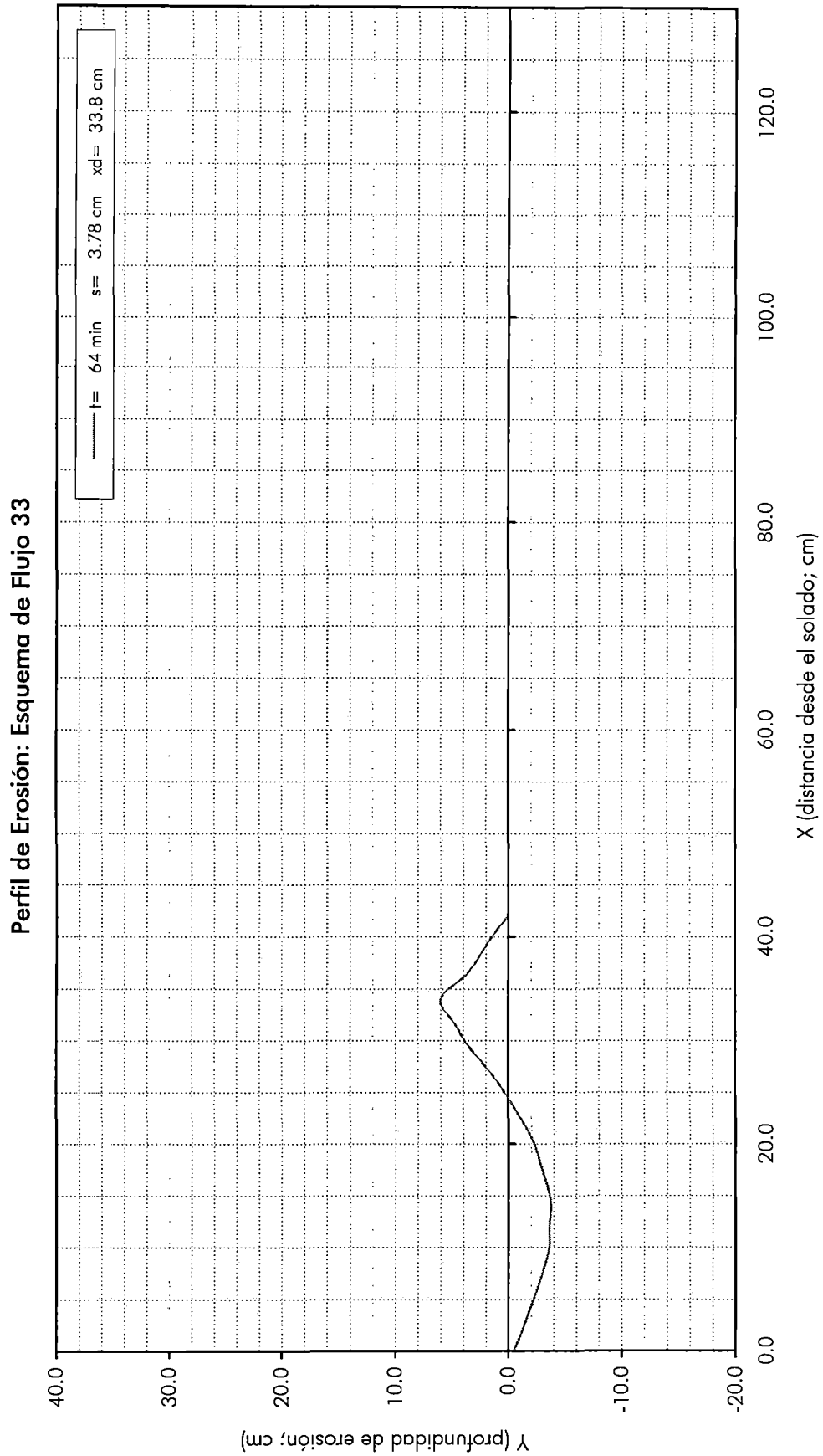
Suelo 1 L = 60 cm b = 6 cm h = 25 cm V = 0,343 m/s

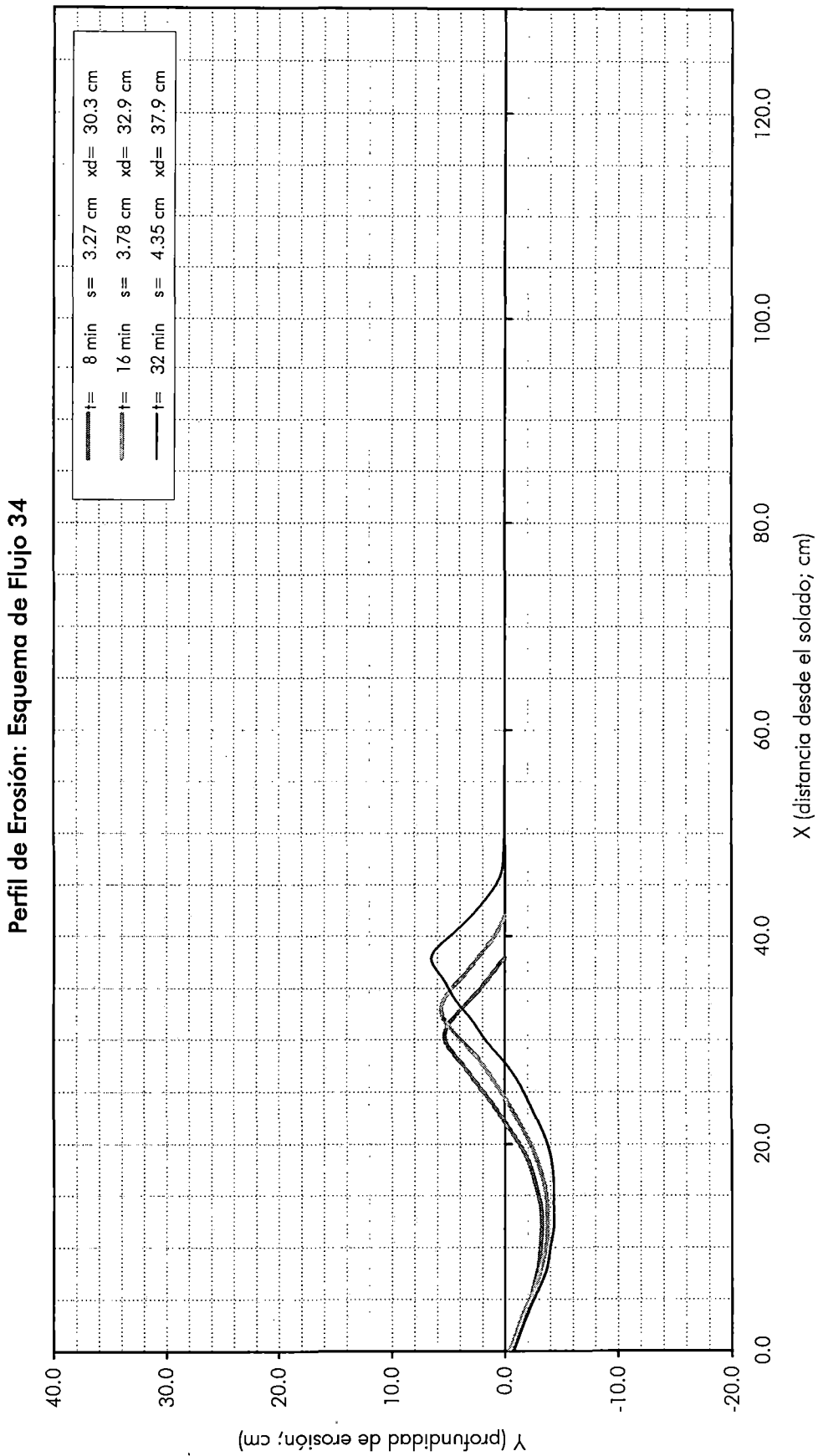


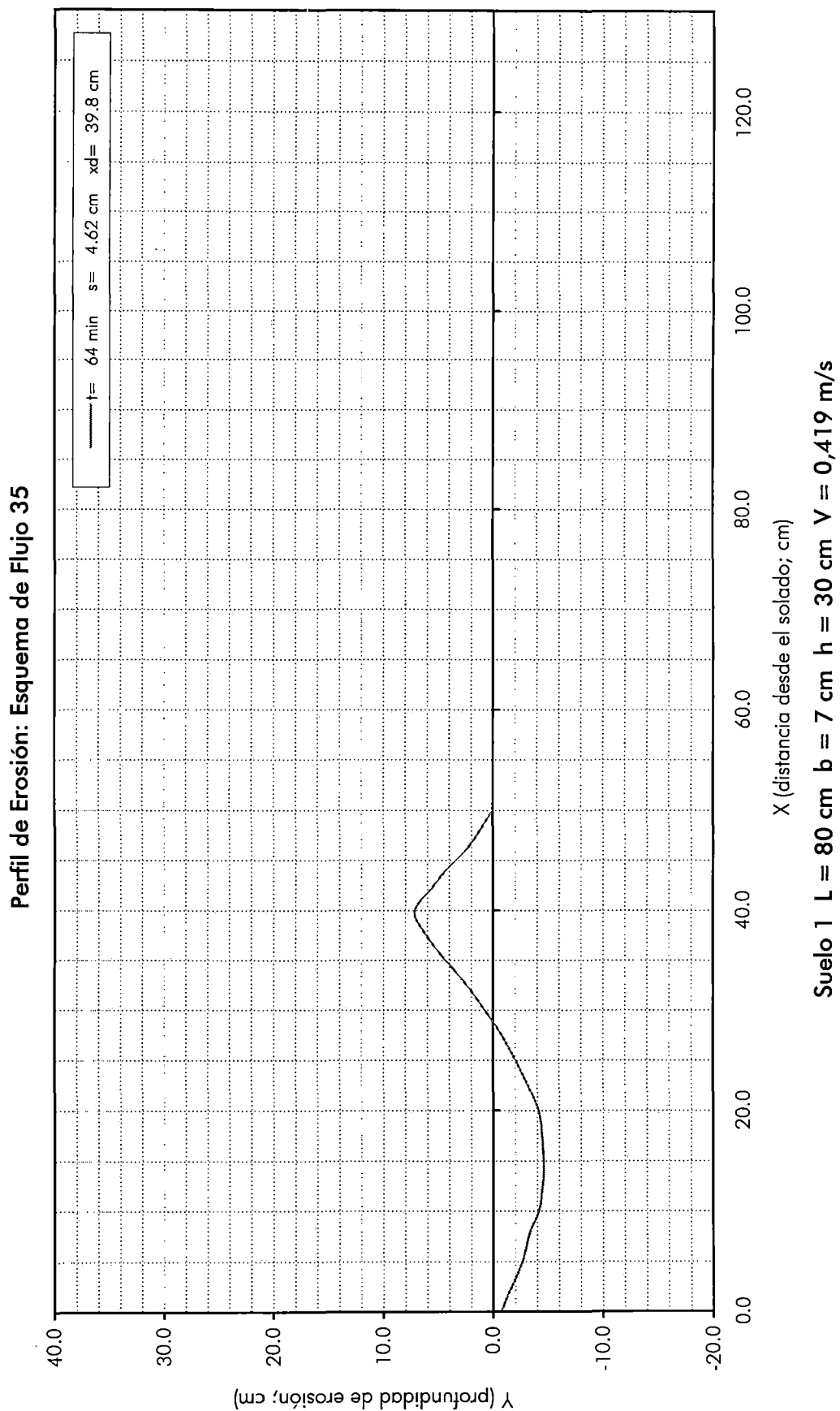


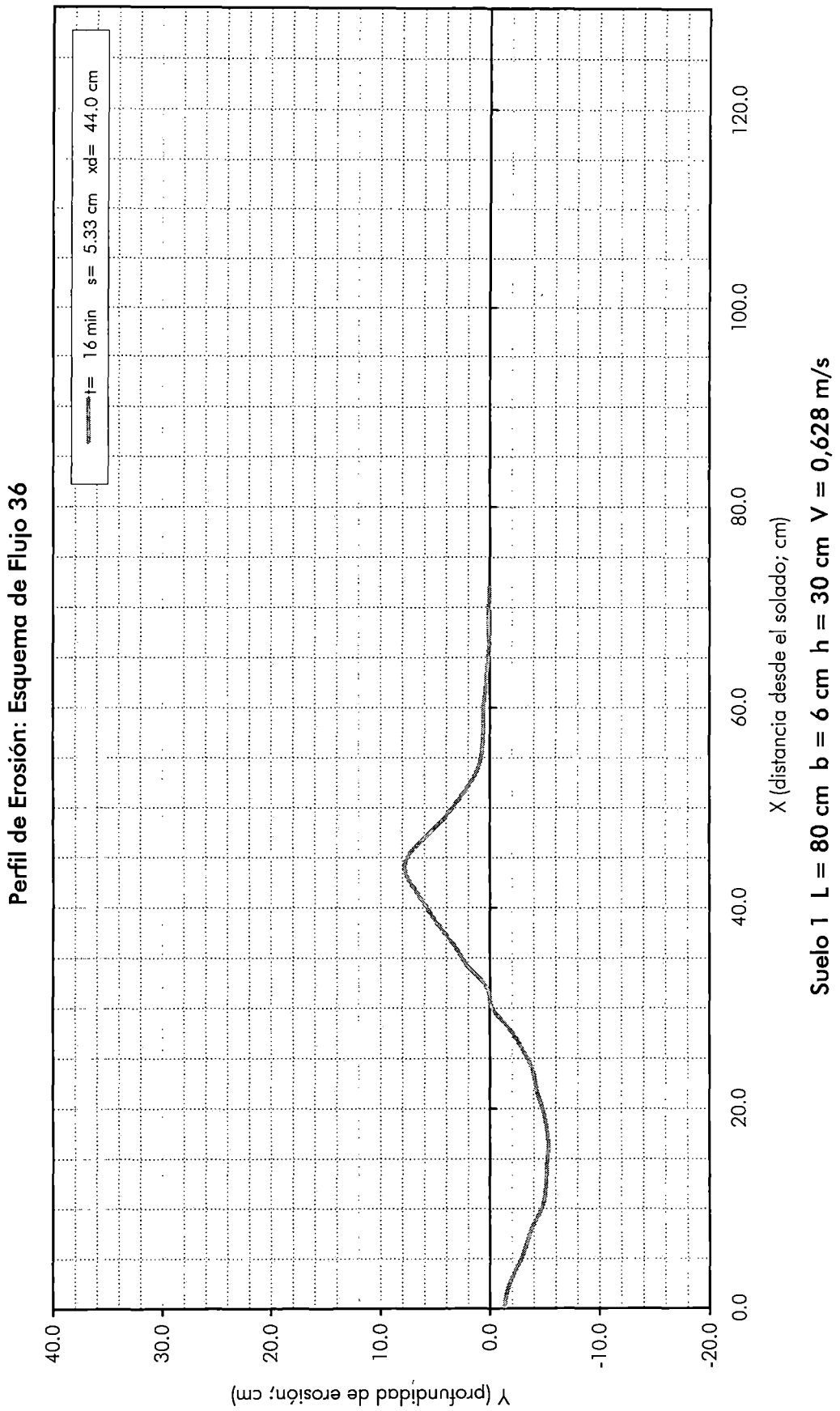




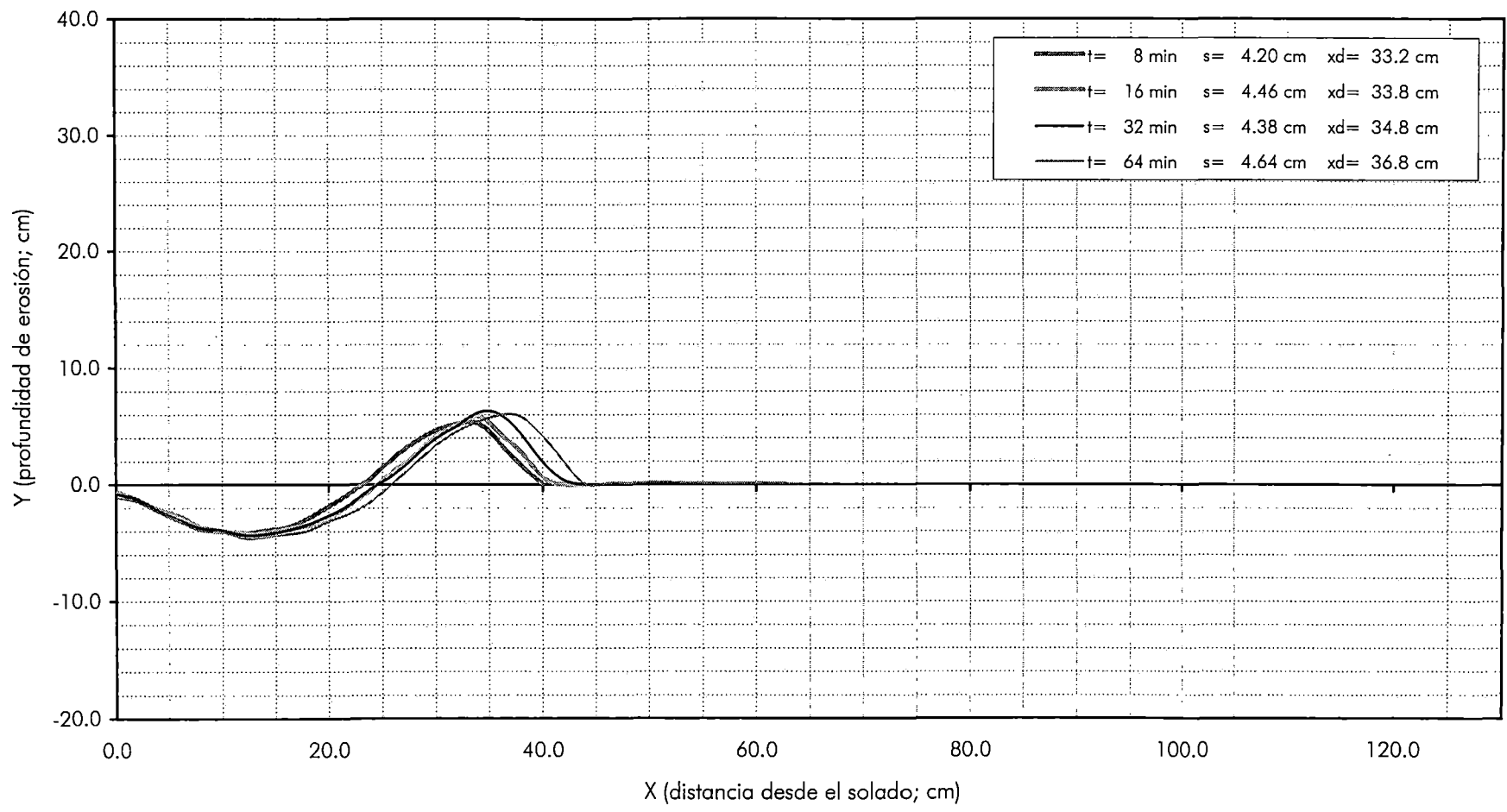






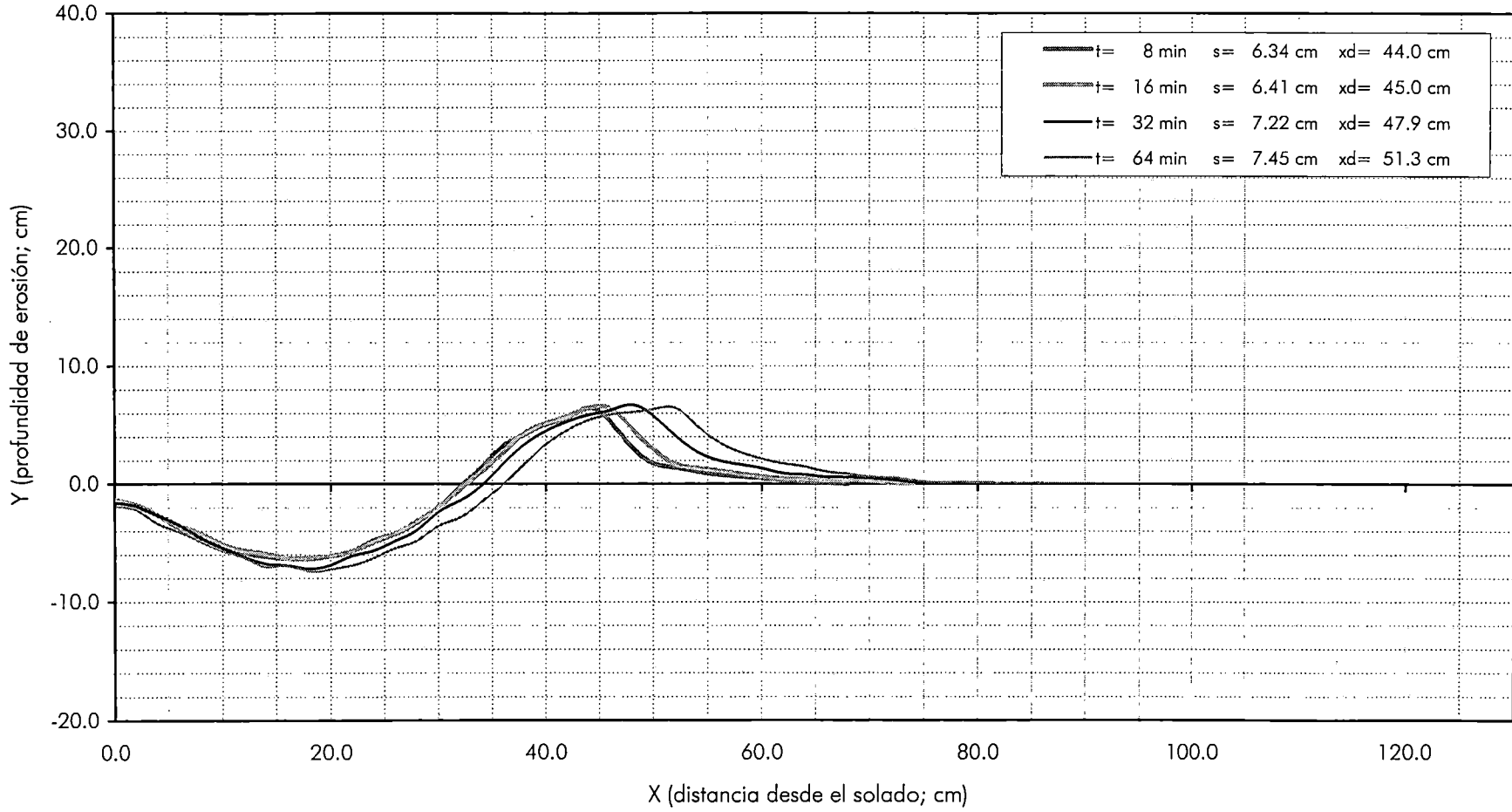


Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 37



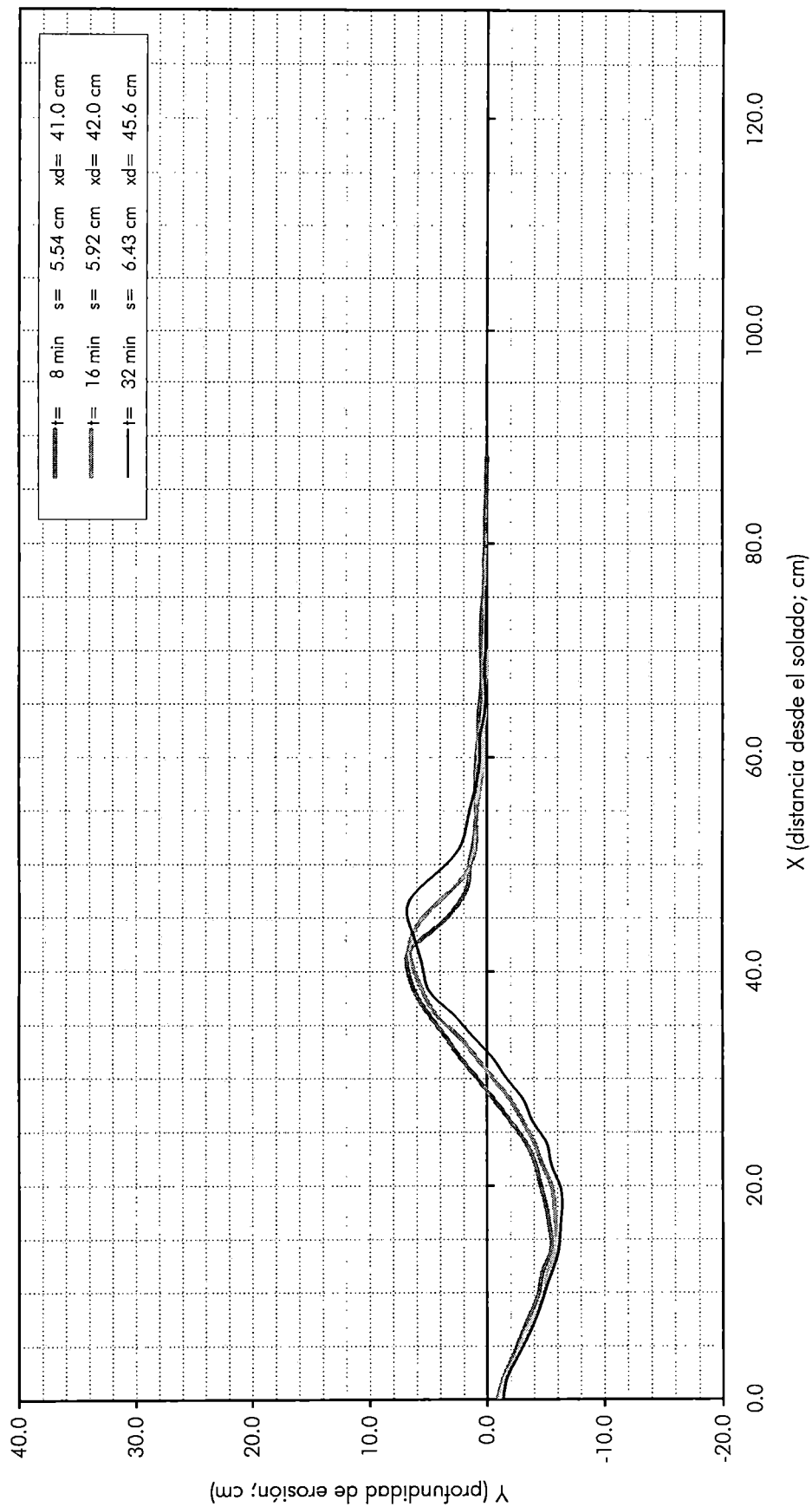
Suelo 2 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,417 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 38



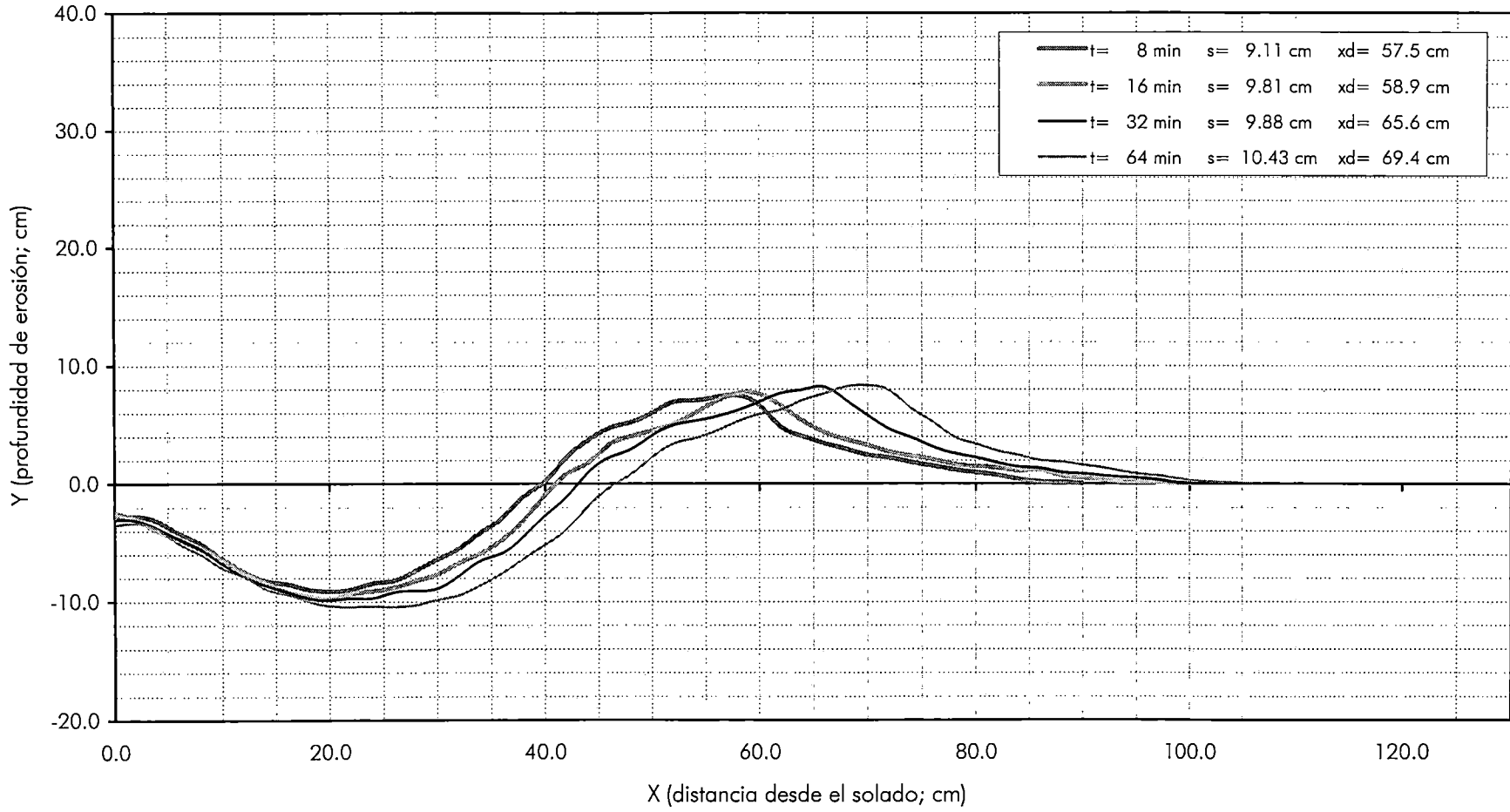
Suelo 2 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,557 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 39



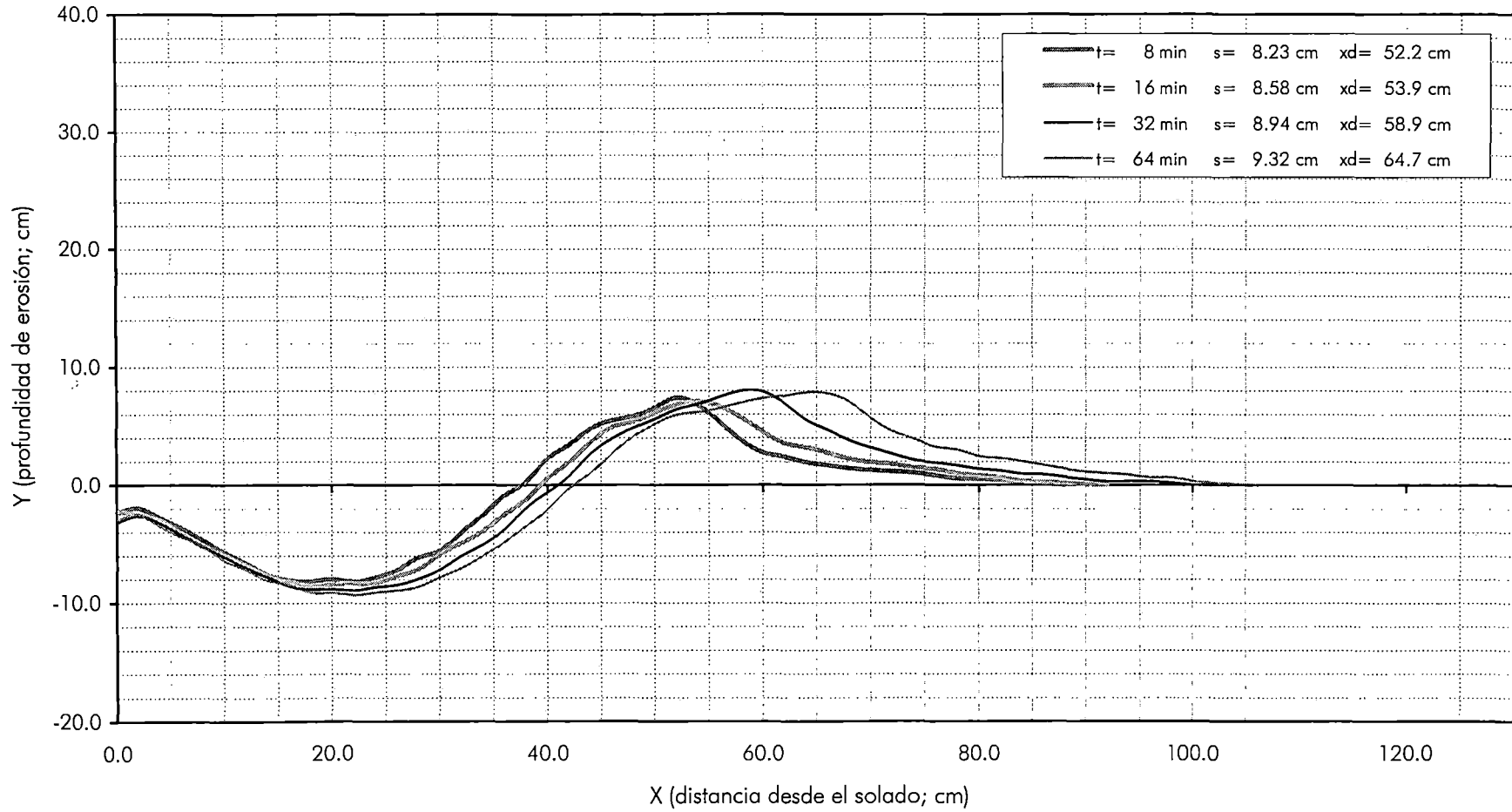
Suelo 2 L = 40 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,477 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 40



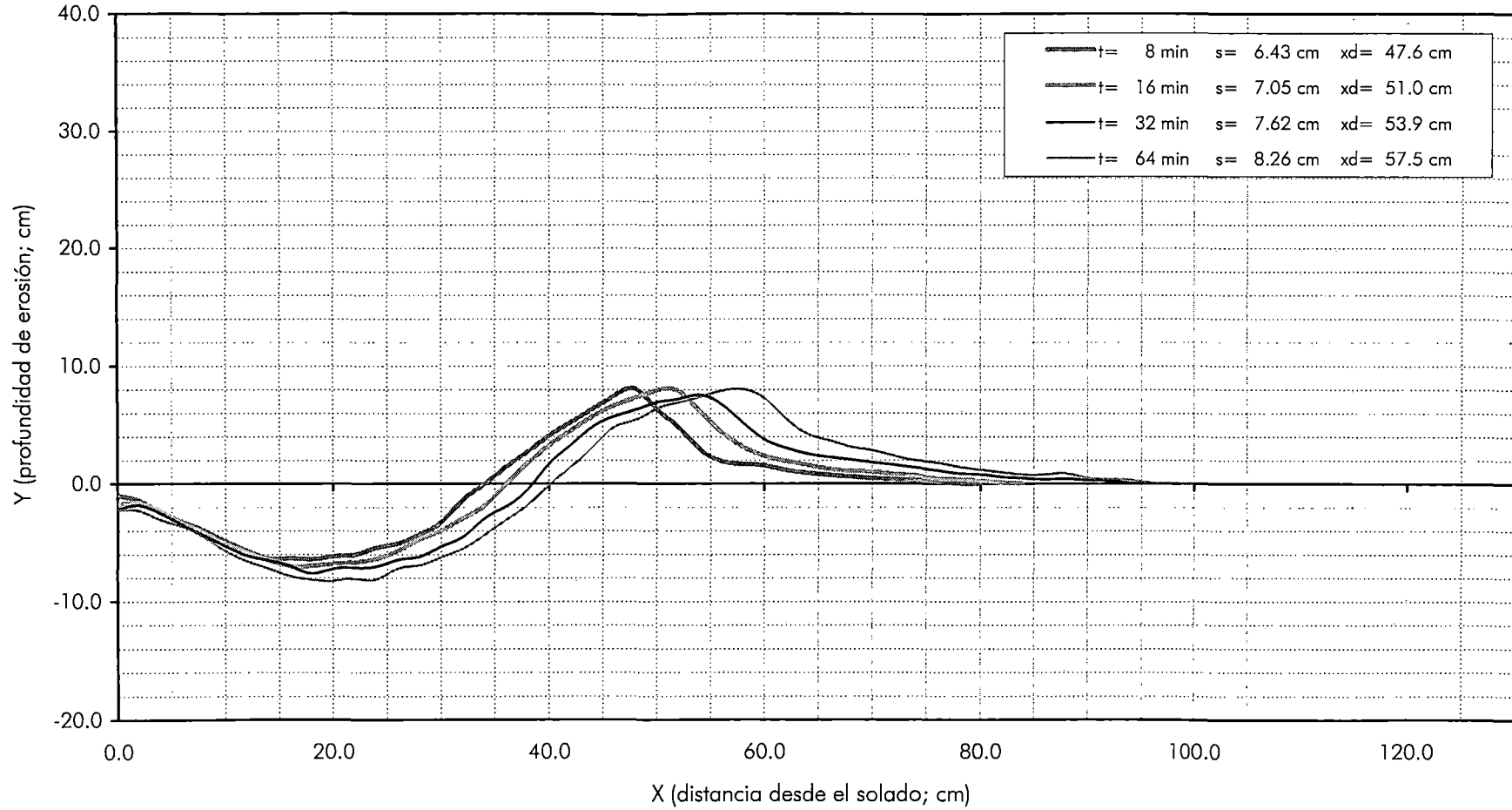
Suelo 2 L = 40 cm b = 6 cm h = 30 cm V = 0,696 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 41



Suelo 2 L = 40 cm b = 7 cm h = 30 cm V = 0,596 m/s

Perfil de Erosión: Esquema de Flujo 42



Suelo 2 L = 40 cm b = 8 cm h = 30 cm V = 0,522 m/s